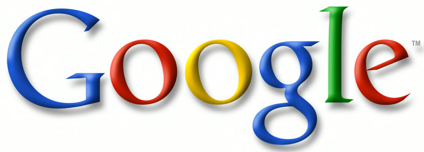
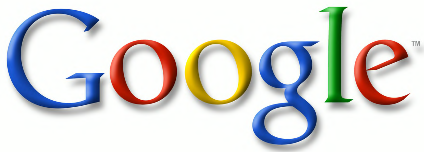



Google


SIGILLUM ACADEMIAE HARVARDIANAE IN NOV ANG
CHRISTO ET ECCLESIAE
VE RI TAS



ANNALES

DES MINES.

Les Annales des Mines sont publiées sous les auspices de l'administration des Mines et sous la direction d'une commission spéciale, nommée par le Ministre des Travaux Publics. Cette commission, dont fait partie le directeur du personnel et du secrétariat, est composée ainsi qu'il suit :

MM.

Guillebot de Nerville, inspecteur général des mines, *président*.

Daubrée, inspecteur général, directeur de l'École supérieure des mines.

Acquot, inspecteur général.

Tournaire, d°

De Chancourtois, d°

Gentil, d°

Bochet, d°

Peschart d'Ambly, d°

Jutier, d°

Lan, inspecteur général, professeur à l'École supérieure des mines.

L. Luuyt, inspecteur général.

Haton de la Goupillière, ingénieur en chef, professeur à l'École supérieur des mines.

Mallard, d°

MM.

Lorieux, ingénieur en chef, secrétaire du conseil général des mines.

Résal, ingénieur en chef, professeur à l'École supérieure des mines.

Keller, ingénieur en chef, chargé du service de la statistique de l'industrie minérale.

Fuchs, ingénieur en chef, professeur à l'École supérieure des mines.

Vicaire, d°

Carnot, ingénieur en chef, inspecteur de l'École supérieure des mines.

Aguillon, ingénieur en chef, professeur à l'École supérieure des mines.

Douvillé, ingénieur, professeur à l'École supérieure des mines.

Zeiller, ingénieur, *secrétaire de la commission*.

L'administration a réservé un certain nombre d'exemplaires des Annales des Mines pour être envoyés, soit, à titre de don, aux principaux établissements nationaux et étrangers, consacrés aux sciences et à l'art des mines, soit, à titre d'échange, aux rédacteurs des ouvrages périodiques, français et étrangers, relatifs aux sciences et aux arts.

Les lettres et documents concernant les Annales des Mines doivent être adressés, *sous le couvert de M. le Ministre des Travaux Publics*, à M. l'Ingénieur secrétaire de la commission des Annales des Mines.

Les auteurs reçoivent *gratis* 20 exemplaires de leurs articles.

Ils peuvent faire faire des tirages à part, à raison de 9 francs par feuille jusqu'à 50, 10 francs de 50 à 100, et 5 francs en plus pour chaque centaine ou fraction de centaine à partir de la seconde. — Le tirage à part des planches est payé sur mémoire, au prix de revient.

La publication des Annales des Mines a lieu par livraisons, qui paraissent tous les deux mois.

Les six livraisons annuelles forment trois volumes, dont deux consacrés aux matières scientifiques et techniques, et un consacré aux actes administratifs et à la jurisprudence. Ils contiennent ensemble 90 feuilles d'impression et 24 planches gravées environ.

Le prix de l'abonnement est de 20 francs pour Paris, de 24 francs pour les départements et de 28 francs pour l'étranger.

PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

ANNALES
DES MINES

OU

RECUEIL

DE MÉMOIRES SUR L'EXPLOITATION DES MINES

ET SUR LES SCIENCES ET LES ARTS QUI S'Y RATTACHENT,

RÉDIGÉES ET PUBLIÉES

SOUS L'AUTORISATION DU MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS.

HUITIÈME SÉRIE.

MÉMOIRES. — TOME IV.

PARIS.

DUNOD, ÉDITEUR,

LIBRAIRE DES CORPS NATIONAUX DES PONTS ET CHAUSSÉES, DES MINES ET DES TÉLÉGRAPHES,

Quai des Augustins, n° 49

—

C1883

LISTE DES ÉCHANGES AUTORISÉS

ENTRE LES ANNALES DES MINES ET LES PUBLICATIONS FRANÇAISES ET ÉTRANGÈRES.

Les *Annales des mines* ont été adressées, à titre d'échange, en 1883, aux Sociétés et publications dont les noms suivent :

1. — The Journal of the FRANKLIN INSTITUTE. *Philadelphie.*
2. — The American Journal of science and arts. *New-Haven.*
3. — AMERICAN PHILOSOPHICAL SOCIETY. *Philadelphie.*
4. — Philosophical Transactions of the ROYAL SOCIETY OF LONDON.
5. — The quarterly Journal of the GEOLOGICAL SOCIETY. *Londres.*
6. — Minutes of the Proceedings of the INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS. *Londres.*
7. — ROYAL IRISH ACADEMY. *Dublin.*
8. — Atti della SOCIETA TOSCANA DI SCIENZE NATURALI. *Pise.*
9. — Bibliothèque universelle et Revue suisse ; partie scientifique : archives des sciences physiques et naturelles. *Genève.*
10. — Mémoires de la SOCIÉTÉ DE PHYSIQUE ET D'HISTOIRE NATURELLE DE GENÈVE.
11. — SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE. *Paris.*
12. — Journal de mathématiques pures et appliquées. *Paris.*
13. — Annales de Chimie et de Physique. *Paris.*
14. — SOCIÉTÉ D'ENCOURAGEMENT POUR L'INDUSTRIE NATIONALE *Paris.*
15. — Journal de Pharmacie et de Chimie. *Paris.*
16. — KAISERLICH-KÖNIGLICHE GEOLOGISCHE REICHSANSTALT. *Vienne.*
17. — ROYAL GEOLOGICAL SOCIETY OF CORNWALL. *Penzance.*
18. — GEOLOGICAL SURVEY OF GREAT-BRITAIN. *Londres.*
19. — ROYAL SOCIETY OF EDINBURGH.
20. — SOCIÉTÉ DE L'INDUSTRIE MINÉRALE. *Saint-Étienne.*
21. — SMITHSONIAN INSTITUTION. *Washington.*
22. — Zeitschrift der DEUTSCHEN GEOLOGISCHEN GESELLSCHAFT. *Berlin.*
23. — Jahresbericht über die Fortschritte der Chemie. *Giessen.*
24. — Zeitschrift des OESTERREICHISCHEN INGENIEUR-UND ARCHITEKTEN-VEREINS. *Vienne.*
25. — Anales de la SOCIEDAD CIENTIFICA ARGENTINA. *Buenos-Ayres.*
26. — Zeitschrift des ARCHITEKTEN UND INGENIEUR-VEREINS ZU HANNOVER. *Hanovre.*

27. — GEOLOGICAL SURVEY OF INDIA. *Calcutta.*
28. — Berg-und Huttenmännische Zeitung. *Leipzig.*
29. — Bulletin de la SOCIÉTÉ INDUSTRIELLE DE MULHOUSE.
30. — SOCIÉTÉ CHIMIQUE DE PARIS.
31. — Il Politecnico. Giornale dell' Ingegnere, Architetto civile ed industriale. *Milan.*
32. — Zeitschrift des VEREINES DEUTSCHER INGENIEURE. *Berlin.*
33. — SOCIÉTÉ DES INGÉNIEURS CIVILS. *Paris.*
34. — OBSERVATOIRE DE PARIS.
35. — BOSTON SOCIETY OF NATURAL HISTORY. *Boston.*
36. — SOCIÉTÉ LINNÉENNE DE NORMANDIE. *Caen.*
37. — Moniteur des intérêts matériels. *Bruxelles.*
38. — Iron. The Journal of science, metals and manufactures. *Londres.*
39. — KÖNIGLICHE UNGARISCHE GEOLOGISCHE ANSTALT. *Bude-Pesth.*
40. — The Journal of the IRON AND STEEL INSTITUTE. *Londres.*
41. — The Engineering and Mining Journal. *New-York.*
42. — NORTH OF ENGLAND INSTITUTE OF MINING AND MECHANICAL ENGINEERS. *Newscatle-upon-Tyne.*
43. — LITERARY AND PHILOSOPHICAL SOCIETY OF MANCHESTER.
44. — Berg-und Hüttenmännisches Jahrbuch der K. K. BERGAKADEMIEN ZU LEOBEN UND PRZIBRAM und der KÖN. UNGAR. BERGAKADEMIE ZU SCHEMNITZ. *Vienne.*
45. — Oesterreichische Zeitschrift für Berg-und Hüttenwesen. *Vienne.*
46. — Revue universelle des Mines et de la Métallurgie. *Liège.*
47. — Transactions of the AMERICAN INSTITUTE OF MINING ENGINEERS. *Easton* (*Pensylvanie*).
48. — REALE ACCADEMIA DEI LINCEI. *Rome.*
49. — AMERICAN CHEMICAL SOCIETY. *New-York.*
50. — ACADEMY OF NATURAL SCIENCES OF PHILADELPHIA.
51. — COMISION DEL MAPA GEOLOGICO DE ESPANA. *Madrid.*
52. — Mémorial de l'Artillerie de la Marine. *Paris.*
53. — MIDLAND INSTITUTE OF MINING, CIVIL AND MECHANICAL ENGINEERS. *Barnsley* (*Yorkshire*).
54. — L'Électricien, revue générale d'électricité. *Paris.*
55. — Giornale del Genio civile. *Rome.*
56. — Le génie civil. *Paris.*
57. — Revista minera y metalurgica. *Madrid.*
58. — Annales de la SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE BELGIQUE. *Liège*
59. — UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Washington.*

BIBLIOGRAPHIE.

DEUXIÈME SEMESTRE DE 1882.

OUVRAGES FRANÇAIS.

1° Mathématiques pures.

Bodemer (G.). — Solutions des problèmes de mathématiques spéciales proposés au concours d'agrégation depuis 1858 jusqu'à 881; par G. Bodemer, professeur agrégé au lycée d'Angoulême. 2e *édition*, revue et augmentée. (11654)

Bos (H.). — Éléments de trigonométrie rectiligne à l'usage des élèves des lycées et collèges et des candidats aux écoles du gouvernement, rédigés conformément aux programmes officiels et contenant de nombreux exercices. (12561)

Bovier-Lapierre (G.). — Éléments de trigonométrie rectiligne à l'usage de l'enseignement secondaire spécial et des écoles normales primaires. (9546)

Briot (C.). — Éléments de géométrie conformes aux programmes de l'enseignement scientifique dans les lycées. Théorie. (10870)

Brunel. — Étude sur les relations algébriques entre les fonctions hyperelliptiques du genre 3. (9828)

Burat (E.). — Traité d'arithmétique à l'usage des élèves des lycées et collèges et des candidats aux écoles du gouvernement, conforme au dernier programme. (12569)

Canonville (J. T.) et T. Girod. — Géométrie descriptive. Traité élémentaire, théorique et pratique, conforme aux programmes officiels de l'enseignement secondaire spécial (3e et 4e années) et de l'enseignement secondaire classique. (12789)

Combescure (E.). — Sur les surfaces dont les lignes de courbure sont planes dans un système seulement. (11685)

DUPUIS (J.). — Tables de logarithmes à quatre décimales, à l'usage des commençants, disposées à double entrée et revues par J. Dupuis. *Edition* stéréotype, contenant les logarithmes des nombres de 1 à 1000 et les logarithmes des sinus et des tangentes des angles de dix minutes en dix minutes jusqu'à 90 degrés. (10925)

GARCET (H.). — Traité d'arithmétique, rédigé conformément au programme de l'enseignement. (12025)

GIROD (F.). — Solutions raisonnées des problèmes énoncés dans le Cours et dans le Traité élémentaire d'arithmétique à l'usage des lycées et des collèges, de tous les établissements d'instruction, des aspirants au baccalauréat ès sciences et au baccalauréat spécial. (6904)

GUICHARD. — Théorie des points singuliers essentiels. (9908)

GUILMIN (A.). — Cours complet d'algèbre élémentaire (n° 1 bis), conforme au programme de l'enseignement secondaire spécial, à l'usage des lycées et collèges et de tous les établissements d'instruction publique, contenant un très grand nombre d'exercices proposés, théoriques et pratiques. (10708)

HATT. — Emploi des constructions graphiques pour la détermination rigoureuse des positions des signaux trigonométriques. (8229)

JAMET (V.). — Note sur le théorème des forces vives. (10469)

LUCAS (E.). — Récréations mathématiques; par M. Edouard Lucas. T. 2. (Qui perd gagne; les Dominos; les Marelles; le Parquet; le Casse-tête; les Jeux de demoiselles; le Jeu icosien d'Hamilton). (7480)

PILLET (J.). — Dessin géométrique, conformément au programme officiel de 1882. (7815)

PILLET (J.). — Préparation aux écoles du gouvernement. Cours élémentaire de lavis. Leçons professées au lycée Henri IV et à l'école Monge. (7816)

STEPHANOS (C.). — Mémoire sur les faisceaux de formes binaires ayant une même jacobienne. (7572)

Tables de logarithmes à cinq décimales pour les nombres de 1 à 10.000 et pour les fonctions trigonométriques de minute en minute. (13515)

TOMBECK (H. E.) — Traité élémentaire d'algèbre, à l'usage des élèves des lycées et des candidats au baccalauréat ès sciences et aux écoles du gouvernement. (12715)

VINOT (J.). — Calculs et comptes faits à l'usage des industriels. (8374)

2° Physique et Chimie.

AMPÈRE (A. M.). — Théorie mathématique des phénomènes électro-dynamiques uniquement déduite de l'expérience; par André-Marie Ampère. 2ᵉ *édition*, conforme à la première publiée en 1826. In-8°, 168 p. et 2 planches. (9514)

ANGOT (A.). — Traité de physique élémentaire (programme de l'enseignement scientifique dans les lycées et collèges et programme du baccalauréat ès sciences). (11923)

BLAREZ (C.). — Histoire des imides. (7623)

BOURGEOIS (L.). — Reproduction par voie ignée d'un certain nombre d'espèces minérales appartenant aux familles des silicates, des titanates et des carbonates. (9823)

DEROSNE (C.). — La photographie pour tous, traité élémentaire des nouveaux procédés. (7676)

DUREAU (G.). — Étude sur l'extraction du sucre des mélasses. (10668)

Encyclopédie chimique, publiée sous la direction de M. Frémy, de l'Institut, directeur du Muséum, par une réunion d'anciens élèves de l'École polytechnique, de professeurs et d'industriels. T. 5. Appplications de chimie inorganique. 5ᵉ fascicule : le Verre et le Cristal; par M. J. Henrivaux, sous-directeur de la manufacture des glaces de Saint-Gobain. In-8°, IV-534 p. avec 240 fig. et atlas de 26 planches. 30 fr. (7373)

—— T. 9. 1ʳᵉ section : Chimie biologique ; par M. Duclaux, maître de conférences à la Sorbonne. In-8°, VIII-908 p. avec 111 fig. 40 fr. (10444)

—— T. 6. Chimie biologique et chimie physiologique. 2ᵉ section. Chimie des végétaux; par M. Frémy. 1ᵉʳ fascicule : Structure de la plante. In-8°, p. 1 à 156. 5 fr. (10443)

FABRE (J. H.). — Cours de physique, ouvrage rédigé conformément aux programmes officiels de 1882. (12834)

—— Les Inventeurs et leurs inventions, histoire élémentaire des principales découvertes dans l'ordre des sciences physiques. (7697)

—— Notions de chimie, ouvrage rédigé conformément aux programmes officiels de 1882. 3 fr. (13601)

GANOT (A.) et G. MANEUVRIER. — Traité élémentaire de physique. (11225)

GARIEL (C. M.). — Traité pratique d'électricité, comprenant les

applications aux sciences et à l'industrie, et notamment à la physiologie, à la médecine, à la télégraphie, à l'éclairage électrique, à la galvanoplastie, à la météorologie. (12327)

GOSSIN (H.). — Cours élémentaire de physique. (8519)

GRIPON (E.). — Cours élémentaire de physique, rédigé conformément aux programmes officiels du 2 août 1880. (12642)

GROLLET (C.). — L'Électricité, ses applications pratiques. (11520)

HOSPITALIER (E.). — Formulaire pratique de l'électricien. (7425)

IMBERT (A.). — De l'astigmatisme. (8237)

JACQUEZ (E.). — Dictionnaire d'électricité et de magnétisme étymologique, historique, théorique, technique avec la synonymie française, allemande et anglaise. (12051)

KNAB (C.). — Étude sur les goudrons et leurs nombreux dérivés. (7443)

LALLEMAND (A.). — Note sur un baromètre enregistreur. (8550)

LANGLEBERT (J.). — Physique. (12064)

LEBLANC (R.). — Manipulations de chimie, leçons pratiques à l'usage des élèves des établissements d'enseignement spécial, professionnel et primaire supérieur. (13150)

PLANTÉ (G.). — Recherches sur l'électricité. (13203)

POGGENDORFF (J. C.). — Histoire de la physique, cours fait à l'université de Berlin; par J. C. Poggendorff. Traduction de MM. E. Bibart et G. de La Quesnerie, professeurs agrégés de l'Université. In-8°, XIV-581 p. avec fig. (13684)

POIRÉ (P.). — Chimie. (12920)

RENARD (A.). — Traité des matières colorantes, du blanchiment et de la teinture du coton, suivi du dégommage et de la teinture de la ramie ou chinagrass. (11339)

REVEILLÈRE (P. E. M.). — Essai sur le magnétisme terrestre. (12463)

SUTTON (F.). — Manuel systématique d'analyse chimique volumétrique, ou le Dosage quantitatif des substances chimiques par les mesures, appliqué aux liquides, aux solides et aux gaz; ouvrage destiné aux recherches de chimie pure, à la chimie pathologique, à la pharmacie, etc. (9770)

TESSIER (P.). — Chimie pyrotechnique, ou Traité pratique des feux colorés. 2e édition, entièrement refondue et augmentée de quelques nouveaux artifices. (7577)

TONDEUR (C.). — Fabrication des liqueurs sans alambic ni aucun autre appareil de distillation. (7270)

TRÈVE (A.). — Physique moléculaire. (8659)
TROOST (L.). — Précis de chimie conforme aux nouveaux programmes. (11095)
TURPIN (E). — Notice sur le peroxyde d'azote AzO^4, l'acide azoteux AzO^3, et l'acide azotique AzO^5HO. (10816)
VAN LOOY (H.). — Le Cabinet du Docteur noir, causeries sur la physique. (9485)
VILLE (J.). — Propriétés générales des phénols. (7877)
VIOLLE (J.). — Cours de physique. (7277)

3° *Géologie, minéralogie, métallurgie.*

BELGRAND (E.) et J. R. BOURGUIGNAT. — La Seine. 1. Le bassin parisien aux âges antéhistoriques : par E. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées, directeur des eaux et des égouts de la ville de Paris. 2ᵉ *tirage*. Planches et paléontologie, suivies d'un catalogue des mollusques terrestres et fluviatiles des environs de Paris à l'époque quaternaire, par M. J. R. Bourguignat. In-4°, 96 pages et 48 planches. (12549)
BELGRAND (E.). — La Seine. I. Le Bassin parisien aux âges antéhistoriques ; par E. Belgrand, inspecteur général des ponts et chaussées, directeur des eaux et des égouts de la ville de Paris. 2ᵉ *édition*. Texte. (11942)
BLEICHER, professeur d'histoire naturelle à l'Ecole supérieure de pharmacie. — Recherches de minéralogie micrographique sur la roche de Thélod et sur le basalte d'Essey-la-Côte. In-8°, 111 pages et planches. (12236)
BOURGEAT. — Géologie : Note orographique sur la région du Jura comprise entre Genève et Poligny. (10590)
CAMPAGNE (E.). — Les Mines, or, argent, fer, cuivre, plomb, étain, zinc, mercure et platine. (9275)
COLLADON (D.). — Résumé historique des études géologiques et des travaux d'excavation entrepris en France et en Angleterre en vue de l'exécution d'un chemin de fer sous la Manche : Renseignements et détails officiels sur les premières études pour la perforation mécanique et l'aération des longs tunnels par l'air comprimé ; Examen des procédés les plus économiques pour le transport des grandes forces motrices. (9299)
DELAIRE (A.). — Les progrès de la géologie et la Conception de l'univers. (10909)
DESHAYES (E.). — Études sur la fonderie : Recherches expérimentales

sur la chaleur possédée par les fontes et les aciers aux températures élevées, températures de fusion ; Recherches expérimentales sur la fusion au cubilot: Fabrication des moulages en fonte malléable et en acier fondu. (9043)

FILACHOU (J. E.). — Principes de géologie. (6894)

HELSON (C.). — Notes sur la nature et le gisement du phosphate de chaux naturel dans les départements de Tarn-et-Garonne et du Tarn. (10713)

HIRN (G. A.). — Phénomènes dus à l'action de l'atmosphère sur les étoiles filantes, sur les bolides, sur les aérolithes. (7422)

HUSSON (F.). — Manuel du poids des fers plats, carrés, ronds, à double té et de la tôle, précédé d'un traité de la nature et de la fabrication des métaux, renfermant une méthode pratique pour trouver le poids d'un objet déterminé, etc. (10720)

LOCARD (A.). — Recherches paléontologiques sur les dépôts tertiaires à *Milne-edwardsia* et *Vivipara* du pliocène inférieur du département de l'Ain. (12879)

MOREAU (G.). — Laveurs d'or (appareils Bazin), nouveau procédé de lavage des minerais. (12412)

NOULET (J. B.). — Nouvelles études sur le gisement quaternaire de Clermont près Toulouse, au double point de vue de la paléontologie et de l'archéologie préhistorique. 10 fr. (8307)

PISANI (F.). — Traité élémentaire de minéralogie. (9436)

4° *Mécanique. — Exploitation des mines. — Droit des mines.*

DE CALIGNY (A.). — Recherches théoriques et expérimentales sur les oscillations de l'eau et les machines hydrauliques à colonnes liquides oscillantes, avec huit planches, par le marquis Anatole de Caligny, correspondant de l'Institut de France, Académie des sciences. 1re partie : Oscillations dans les tuyaux, ondes liquides, phénomènes de succion, fontaines intermittentes, etc. 2e partie : Écluses de navigation, moteurs hydrauliques, machines élévatoires, machines d'épuisement, machines soufflantes et à comprimer l'air, pompes, etc. (9557)

DELAUNAY (C.). — Traité de mécanique rationnelle. (12278)

DÉPIERRE (J.). — Monographie des machines à laver employées dans le blanchiment, la teinture des fils, écheveaux, chaînes, bobines, le blanchiment et la fabrication des toiles peintes. (11465)

FOUGEROUSSE (A.). — La Mine au mineur, monographie des mines

de Rancié (Ariége); par A. Fougerousse, secrétaire général adjoint de la Société d'économie sociale. In-8°. 16 p. Paris. 1 fr. (7397)

GÉRARDIN (A.). — Cours de mécanique expérimentale à l'usage des élèves de l'enseignement secondaire spécial et des écoles professionnelles, contenant 181 figures. (13377)

HARRAND (C.) et E. BADOIS. — Les Ascenseurs hydrauliques pour bateaux : Notice sur l'ascenseur hydraulique pour bateaux (système Edwin Clark). (12861)

SEYRIG. — Les Ascenseurs hydrauliques. (12951)

TRESCA. — Cours de mécanique appliquée, professé à l'École centrale des arts et manufactures. (8657)

5° *Constructions. — Chemins de fer.*

AMOUDRUZ (V.). — Assainissement de Paris : Le tout à l'égout rationnel obtenu par la vidange hydraulique : mémoire présenté à la commission technique d'assainissement de la ville de Paris. (7284)

BARRÉ (H.). — Formules et tables numériques destinées à faciliter et à abréger les calculs concernant la topographie, les routes et les constructions; par H. Barré et L. Roussel, professeurs à l'École forestière. Supplément par H. Barré. In-8°, 54 p. (12546)

BELGRAND. — Les travaux souterrains de Paris; par M. Belgrand, de l'Institut. Tomes 3 et 4. Première partie : les Eaux; première section : les Anciennes eaux; deuxième section : les Eaux nouvelles. 2 vol. In-8°. Première section, x-783 p. avec fig. et atlas in-f° de 29 planches; deuxième section, VIII-400 p. avec portrait de l'auteur, gravures et atlas in-f°. Prix 125 fr. (11642)

BLANC (C.). — Grammaire des arts décoratifs. Décoration intérieure de la maison. (9246)

Chemins (les) de fer stratégiques; par un ancien élève de l'École polytechnique. (11180)

FRANCQ (L.). — Communication sur le chemin de fer métropolitain de Paris. (11502

GOUPIL (F.). — La Perspective expérimentale, artistique, méthodique et attrayante, ou l'Orthographe des formes, science indispensable aux amateurs et artistes, aux photographes, aux peintres, sculpteurs, etc. (6906)

HUSSON (J.). — 15° édition du tarif des façons et marchandises de serrurerie adopté dans tous les ateliers de Paris. (6911)

LEGER (A.). — Les canaux dérivés du Rhône; un projet plus économique. (11769)
LE PICARD (E.). — Extraits et analyse de l'Étude sur l'organisation et l'outillage des ports de commerce de l'Europe septentrionale, par M. Plocq, inspecteur général des ponts et chaussées, pour servir à l'étude de l'organisation et de l'outillage du port de Rouen. (9105)
MEYER (J.). — Traversée du Simplon par un chemin de fer, nouvelles études exécutées en 1881 et 1882. (9410)
NOEL (O.). — L'Achèvement du réseau et les Conventions avec les grandes compagnies. (6960)
PICARD (A.). — Les chemins de fer français, étude historique sur la constitution et le régime du réseau, débats parlementaires, actes législatifs, réglementaires, administratifs, etc. (9730)
PLANÈS (F. M. A.). — Notice sur le chemin de fer aérien, dit planisphérique de la ville de Paris. (11049)
POIRRIER (A.). — Tarifs des chemins de fer; Modifications proposées par les compagnies Paris-Lyon-Méditerranée et de l'Est; rapport présenté à la chambre de commerce de Paris, au nom de la commission des transports. (8320)
ROUDAIRE. — La Mer intérieure africaine. Lettre-préface de Ferdinand de Lesseps. (8637)
SERGUEEFF (N.). — Travaux publics en Russie. Mémoire sur le canal maritime entre Saint-Pétersbourg et Cronstadt. (8350)
SÉRIS (H. L. L.). — Le Chemin de fer du Pacifique et la Californie, d'après ses explorateurs et ses géographes. (9471)
TOMYAR (C.). — Les Nouvelles conventions au point de vue stratégique; les Chemins de fer en temps de guerre. (12716)
VAN OVERBECK DE MEIJER. — Les systèmes d'évacuations des eaux et immondices d'une ville, revue critique. (9487)
VERRINE (J.). — Guide du niveleur, méthodes et instruments de nivellement. (7585)

6° *Sujets divers.*

BERNHEIM (G.). — Incombustibilisation des théâtres et bâtiments. (9242)
BOIVIN (E.). — Actualités scientifiques; Procédé au collodion sec. (9818)
BOUSSINGAULT (J.). — Extrait d'un rapport sur l'analyse des vins présentés à l'exposition universelle de 1878. (7634)
BUROT. — Note sur la fabrication du papier de paille. (7299)

CANET (G.). — Étude d'un frein hydraulique pour affût de 155 millim., modèle 1877. (11962)

CHABAUD (N.). — Des accidents observés dans les appareils à air comprimé employés aux travaux sous-marins et particulièrement de ceux dus à une décompression trop brusque (quelques moyens d'y remédier). (7649)

CHARDON (C. A.). — Cours pratique de dessin linéaire, de géométrie et d'architecture, ouvrage à l'usage des écoles, des pensions, des cours d'adultes, des arpentenrs, etc. : géométrie, arpentage et dessin linéraire élémentaire. (13327)

COCHIN (D.). — La Compagnie du gaz et la Ville de Paris, traité, négociations, rapports. (9298)

DARY (G.). — La navigation électrique. (7331)

DÉSORTIAUX (E.). — Rapport fait au ministre de la guerre sur une mission en Autriche et en Allemagne (10 septembre-13 octobre 1880). (9869)

DOUMENJOU (H.). — Études sur la revision du code forestier : les Reboisements en France et en Algérie. (9321)

DUBUS (F.). — Les conventions de l'État avec les six grandes compagnies de chemins de fer, causes, objet, conséquences. Une solution : économie de deux milliards et pas d'emprunts, simples observations soumises au gouvernement, au Sénat et à la Chambre des députés. (12616)

DURAND-CLAYE (A.). — Note sur l'utilisation agricole et l'épuration des eaux d'égout de la ville de Paris (essais de Clichy). (7367)

DUSSIEUX (L.). — Le Siège de Belfort. (9602)

FAUCHER (L.). — Le grand hiver de 1879-80 et l'embâcle de la Loire à Saumur, communication faite à la Société de géographie. (6890)

FOCILLON (A.). — Cours élémentaire d'histoire naturelle rédigé d'après le nouveau programme de l'enseignement scientifique des lycées. (6895)

GIROD (F.). — Trigonométrie pratique réduite à la résolution des triangles, à l'usage des écoles normales primaires, des écoles primaires supérieures et de toutes les personnes qui s'occupent d'opérations sur le terrain. (13108)

LEFEBVRE (A.). — Action de l'huile pour calmer les vagues de la mer et dérider la surface des eaux. (8256)

LOIR (E.). — Suppression du chaînage dans le nivellement et le lever des plans, méthode simple, précise, rapide, donnant simultanément la configuration et le relief des terrains de toute étendue. (12090)

Maupeou (L. de). — Abordages et cloisons étanches. (12106)
Moïse (C.). — Questions départementales : Du gaz d'éclairage ; Chauffage et force motrice dans le département de la Seine, études sur la question. (9124)
Molinari (E. de). — L'industrie du sucre en Russie. (9125)
Montricher (H. de). — La Décantation des eaux du canal de Marseille et le bassin de Saint-Christophe, conférence faite à la Société scientifique de Marseille, le 12 octobre 1882. (9707)
Mouillefert (P.). — Vignes phylloxérées; Faits établissant l'efficacité et la haute valeur du sulfocarbonate de potassium pour phylloxéra, etc. : Dix années d'étude et d'application en grande culture. (8296)
Notions élémentaires de fortification passagère, à l'usage des volontaires d'un an. (Services de l'infanterie. (In-32, 31 p. avec figures. (6961)
Perron (L.). — De la giration des ballons libres et des moyens d'y remédier. (8606)
Pizzighelli (J.) et Hubl. — La Platinotypie, exposé théorique et pratique d'un procédé photographique aux sels de platine permettant d'obtenir rapidement des épreuves inaltérables. (12444)
Plessix (H.). — Manuel complet d'artillerie, rédigé conformément au programme du cours d'artillerie professé à l'École spéciale militaire et au programme d'admission à l'École supérieure de guerre. (12705)
Poillon (L.). — Essai sur les pompes convenant aux irrigations, à la submersion des vignes et aux épuisements. (10511)
Pompéien-Piraud (J. C.). — Navigation aérienne; Direction des ballons; Notes sur le ballon et l'appareil de direction et d'aviation inventé et construit. (9457)
Privat-Deschanel et A. Focillon. — Dictionnaire général des sciences théoriques et appliquées. (13207)
Tiret. — Instruction sur la manœuvre d'un va-et-vient à l'usage des naufragés. (12183)
Valby (H.). — Le Vin, 1° par le sucre, 2° par les raisins secs; la Vigne en Tunisie et en Algérie. (12968)
Vallot (J.). — Recherches physico-chimiques sur la terre végétale et ses rapports avec la distribution géographique des plantes. (7872)
Van Monckhoven (D.). — Instruction sur le procédé au gélatino-bromure d'argent. (12194)
Vignes américaines. Irrigations, sulfure de carbone, sulfocarbo-

nate de potassium. Réunions publiques organisées par la Société centrale d'agriculture de l'Hérault à l'école d'agriculture de Montpellier le 3, le 6 et le 7 mars 1883. (8672)

OUVRAGES ANGLAIS.

Parliamentary. Channel tunnel... Le tunnel de la Manche, rapport du comité. 0f,65.

—— *Mines. Inspector's...* Rapport des inspecteurs des mines pour 1882. 25 fr.

—— *Railway returns...* Rapport sur les chemins de fer pour 1882. 1f,50.

—— *Channel tunnel...* Comité du tunnel de la Manche. Rapport et dépositions. 8f,75.

—— *Electric lighting...* Éclairage électrique. Ordres provisoires. Rapport et dépositions. 2f,20.

—— *Railways. General...* Chemins de fer. Rapport général pour 1882. 0f,35.

—— —— *Continuous...* Freins continus. Rapports jusqu'au 30 juin. 1f,60.

—— *East India...* Chemins de fer de l'Inde. Rapport pour 1881-1883. 1f,15.

—— *Railway accidents..* Accidents de chemins de fer. Rapport général pour 1882. 0f,75.

—— —— Rapports jusqu'au 30 juin 1883. 2f,60.

GRESLEY. *A glossary...* Dictionnaire des termes usités dans l'exploitation des mines. In-8°, 306 p. 6f,25.

COLE. *Geological rambles...* Excursions géologiques dans le Yorkshire. In-8°. 1f,25.

Challenger Report... Rapport sur les résultats scientifiques du voyage du *Challenger* pendant les années 1873-76; préparé sous la direction de feu *C. Wyville Thomson* et aujourd'hui de *John Murray*. Zoologie. Vol. 7. In-4°. 37f,50.

GLAISHER. *Factor table...* Table des facteurs pour le sixième million, contenant le dernier facteur de chaque nombre non divisible par 2, 3 ou 5, entre 5.000.000 et 6.000.000. In-4°. 25 fr.

GLADSTONE and TRIBE. *The chemistry...* La chimie des batteries secondaires de Planté et Faure. In-12, 60 p. 3f,15.

GRAHAM. *Graphic...* Statique graphique et analytique; théorie et comparaison. In-8°, 382 p. 20 fr.

Blackie. *The elements...* Éléments de dynamique. Edimbourg. Nouvelle édition. In-8°, 210 p. 4f,40.

Reynolds. *Locomotive engine...* Conduite des locomotives. 6e édition. In-8°, 270 p. 5f,65.

—— *The model...* L'ingénieur et le chauffeur de locomotive modèles. In-8°, 256 p. 4f,40.

Williams. *Elementary...* Mécanique élémentaire. In-12. 0f,65.

Thomson. *A treatise...* Traité du mouvement des anneaux tournants. In-8°, 128 p. 7f,50.

Duke of Argyll. *Continuity...* Continuité et catastrophes en géologie. Edimbourg. In-8°, 32 p. 1f,25.

Bashforth. *An attempt...* Essai d'épreuve des théories des actions capillaires par la comparaison des formes théoriques et réelles des gouttes de fluide. In-4°, 120 p. 26f,25.

Cumming. *Granite crags.* Rochers granitiques. In-8°, 386 p. 20 fr.

Dawson. *Story of the earth...* Histoire de la terre et de l'homme. 3e édition, augmentée et corrigée. In-8°. 9f,40.

Marvin. *The petroleum...* Le pétrole de l'avenir. Bakou, la Pétrolia européenne. In-8°. 1f,25.

Keeping. *The fossils....* Les fossiles et les affinités paléontologiques des dépôts néocomiens d'Upware et de Brickhill. In-8°, av. planche. 15f,65.

OUVRAGES AMÉRICAINS.

Poor. *Manual...* Manuel des chemins de fer des États-Unis pour 1883. 16e année. New-York. In-8°, CVIII-1055-215 p.

Flym. *Hydraulic tables...* Tables hydrauliques pour le calcul de la perte de charge dans les égouts, les tuyaux et les conduites d'eau. New-York. In-8°, 144 p. 3f,15.

Burr. *The elasticity...* Elasticité et résistance des matériaux. New-York. In-8°, XV-753 p. 31f,25.

Mac Cord. *Kinematics...* Cinématique : traité de la modification du mouvement, au point de vue des formes et des modes de liaison des organes mobiles des machines. New-York. In-8°, IX-335 p. 31f,25.

Hale. *In the coal...* Aux pays du charbon et du fer, dans la Caroline du nord. New-York. In-12, 425 p., av. une carte. 9f,40.

OUVRAGES SUISSES.

O. Heer. *Flora fossilis arctica. Die fossile...* Flore fossile des régions polaires. Zurich. In-4°. T. VII, 2° partie de la flore fossile du Groenland. 275 p., av. 62 pl. et 1 carte géologique. 60 fr.

OUVRAGES ALLEMANDS.

Cohen. *Sammlung...* Collection de microphotographies montrant la structure des minéraux et des roches, exécutées par *J. Grimm*, à Offenburg. Stuttgart. Livraisons 8 à 10 (fin). In-4°, 32 pl. 40 fr.

Credner. *Geologische Profile...* Profils géologiques à travers le sol de la ville de Leipzig et de ses environs immédiats. Leipzig. In-8°, v-71 p., av. un plan. 6f, 25.

Die wissenschaftlichen... Les résultats scientifiques de l'expédition de la Véga ; publiés par *A.-E. Nordenskiöld*. Edition allemande. Leipzig. In-8°. Livraisons 2 à 6 (tome I, p. 65-384). Chaque livraison 2f,50.

Grewingk. *Geologie....* Géologie et archéologie du dépôt marneux de Kunda en Esthonie. Dorpat. In-8°, 72 p., av. 3 pl. 2f,50.

Helmholtz. *Wissenschaftliche...* Mémoires scientifiques. Leipzig. In-8°. Tome II, 2° partie, VII p. et p. 481-1021, av. 5 pl. 12f,50.

Jahn. *Die Electrolyse...* L'électrolyse et son importance pour la chimie théorique et appliquée. Vienne. In-8°, IX-206 p. 5f,50.

Martini und Chemnitz. *Systematisches Conchylien-Cabinet...* Collection systématique de coquilles. Publié et complété par *H. C. Küster*, en collaboration avec Philippi, L. Pfeiffer, Dunker, etc.; continué après sa mort par *W. Kobelt* et *H. C. Weinkauff*. Nuremberg. In-4°. Livraisons 319-322 ; 146 p., av. 28 pl. coloriées. Chaque livraison 11f,25. — Sections 103 et 104 ; 94 p., 17 pl.; — 66 p., 16 pl. Chaque section 33f,75.

Palæontologische Abhandlungen... Mémoires paléontologiques, publiés par *W. Dames* et *E. Kayser*. Berlin. In-4°. T. I, fasc. 2, 166 p., 19 pl. (Sur la faune de mammifères fossiles de Punin, près Riobamba, dans l'Equateur).

Baume. *Die Kieferfragmente...* Les fragments de mâchoires de la Naulette et de la caverne de Schipka comme preuves de l'existence de races humaines inférieures à l'époque diluvienne. Leipzig. In-8°, IV-46 p. 3f,25.

BEHRENS. *Beiträge*... Contributions à la pétrographie de l'archipel indien. Amsterdam. In-8°, 24 p., 2 pl. 2 fr.

FORCHHEIMER. *Ueber Sanddruck*... Sur la pression du sable et les phénomènes de mouvement à l'intérieur du sable sec. Aix-la-Chapelle. In-8°, 53 p., 1 pl. 3f,15.

HAGEN. *Geschwindigkeit*... Vitesse de l'eau courante à différentes profondeurs, d'après les mesures de Brünings. Berlin. In-4°, 79 p., 1 pl. 5 fr.

HALAVATS. *Palæontologische Daten*... Observations paléontologiques sur la faune des dépôts néogènes du sud de la Hongrie. Bude-Pesth. In-8°. I, Faune pontique de Langenfeld. 12 p., av. 2 pl. 1f,25.

LÜTTIG. *Die Bewegung*... Mouvement d'une droite matérielle rigide à masse uniformément répartie, sur des surfaces cylindriques, spécialement sur un cylindre parabolique, sous l'influence de la pesanteur et d'impulsions initiales. Iéna. In-8°, 39 p. 2f,50.

MEYER. *Apolarität*... Apolarité et courbes rationnelles; étude systématique préalable pour une théorie générale des espaces linéaires. Tubingue. In-8°, XIV-406 p. 15 fr.

NEUMANN. *Einleitung*... Introduction à la physique théorique. Leipzig. In-8°, X-291 p. 10 fr.

NÖLDEKE. *Vorkommen*... Gisement et origine du pétrole. Celle. In-8°, XI-116 p. 4f,50.

Palæontographica. Beiträge... Contributions à l'histoire naturelle des temps primitifs. Publié par *W. Dunker* et *K. A. Zittel*. Cassel. In-4°. T. XXIX (3e série, t. V), livraisons 5 et 6, p. 249-348, av. 10 pl. 75 fr. — T. XXX (3e série, t. VI), 1re partie, et 2e partie, 1re livraison, VI-CXLII-237 p., av. 1 carte en chromolithographie, 37 pl.; et 59 p. av. 11 pl. 315 fr.

PFAFF. *Die Entwicklung*... Le développement du monde d'après la théorie des atomes. Heidelberg. In-8°, X-241 p., 31 fig. 6f,25.

SUESS. *Die Sintfluth*... Le déluge, étude géologique. Prague. In-8°, 74 p. 5 fr.

—— *Das Antlitz*... La face de la terre. Prague. In-8°, 1re partie, 310 p. 12f50.

ZINCKEN. *Die geologischen*... Les horizons géologiques des combustibles fossiles. Leipzig. In-8°, VII-90 p. 3f,75.

BACHARACH. *Abriss*... Esquisse de l'histoire de la théorie du potentiel. Gœttingue. In-8°, III-78 p. 2f,50.

ENGEL. *Geognostischer Wegweiser*... Guide géologique dans le

Würtemberg. Stuttgart. In-8°, XV-326 p., av. 6 pl. et une carte géologique coloriée. 9f,50.

V. ETTINGSHAUSEN. *Beitrag...* Contribution à la connaissance de la flore tertiaire de l'île de Java. Vienne. In-8°, 19 p., avec 6 pl. 2f,25

—— *Beiträge...* Contributions à la connaissance de la flore tertiaire de l'Australie. Vienne. In-4°, 48 p., avec 6 pl. 6f,50.

HAHN. *Insel-Studien...* Etudes sur les îles; essai d'une répartition des îles fondée sur les conditions orographiques et géologiques. Leipzig. In-8°, IV-208 p., avec une carte en couleurs. 9 fr.

Handwörterbuch der Chemie... Dictionnaire de chimie, publié par *Ladenburg* avec le concours de Berend, Biedermann, Drechsel, etc. Breslau. In-8°. T. I, VIII-712 p. 22f,50.

HILBER. *Recente und im Löss...* Coquilles terrestres récentes et du lœss, de la Chine. Vienne. In-8°, 40 p., avec 3 pl. 1f,75.

KÆMPFER. *Ueber die Messung...* Sur la mesure des forces électriques au moyen du volant électrique. Berlin. In-8°, 36 p. 1f,25.

SCHLEGEL. *Theorie...* Théorie des figures de l'espace de composition homogène. Halle. In-4°, 119 p., av. 9 pl. 15f,65. (Extr. des *Nova acta d. k. Leop. Carol. deutsch. Akad. d. Naturforscher.*)

G. STACHE. *Fragmente...* Fragments d'une faune du calcaire carbonifère d'Afrique, provenant de la région du Sahara occidental. Vienne. In-4°, 50 p., av. 7 pl. 6f,75.

UHLIG. *Die Cephalopodenfauna...* La faune de céphalopodes des couches de Wernsdorf. Vienne. In-4°, 166 p., av. 32 pl. 25 fr.

V. BAUERNFEIND. *Neue Beobachtungen...* Nouvelles observations sur la période journalière des hauteurs barométriques. Munich. In-4°, 50 p., av. 1 pl. 1f,90.

BODLÆNDER. *Ueber das optische...* Sur le pouvoir rotatoire optique de mélanges isomorphes de dithionates de plomb et de strontium. Breslau. In-8°, 34 p. 1f,25.

HESS. *Einleitung...* Introduction à l'édude de la division de la sphère avec considération spéciale de son application à la théorie des polyèdres à faces égales et des polyèdres à angles égaux. Leipzig. In-8°, X-472 p., av. 16 pl. 17f,50.

MAKOWSKY. *Die erloschenen Volkane...* Les volcans éteints de la Moravie septentrionale et de la Silésie autrichienne. Brünn. In-8°, 33 p., avec une carte. 2 fr.

NEUMANN. *Hydrodynamische...* Recherches hydrodynamiques, avec un appendice sur les problèmes de l'électrostatique et de l'induction magnétique. Leipzig. In-8°, XL-320 p. 14 fr.

SCHLESINGER. *Ueber conjugirte...* Sur des formes binaires conjuguées. Breslau. In-8°, 57 p. 1f,25.

Walter und Emil v. Dunikowski. *Das Petroleumgebiet...* La région à pétrole des Carpathes occidentaux de Galicie. Vienne. In-8°, IV 100 p., av. 2 pl. et 1 carte en chromolithographie. 3f,75.

Wittenbauer. *Kinematik...* Cinématique du rayon: exposition du mouvement du rayon dans le plan d'après les principes de la mécanique. Gratz. In-8°, V-105 p. 5 fr.

Brezina. *Krystallographische...* Recherches cristallographiques sur des séries homologues et isomères. Vienne. In-8°. 1re partie, XIV-359 p., av. 1 pl. 20 fr.

F.-E. Geinitz. *Die Flötzformationen...* Les formations stratifiées du Mecklembourg, avec une carte géologique du Mecklembourg et 3 planches. Güstrow. In-8°, 150 p. 10 fr.

Landenberger. *Die Zunahme...* L'accroissement de la température avec la profondeur est dû à l'action de la pesanteur. Stuttgart. In-8°, 28 p. 1f,50.

Morgenroth. *Die fossilen Pflanzenreste...* Les restes de plantes fossiles du diluvium des environs de Kamenz, en Saxe. Halle. In-8°, 50 p., av. 1 pl. 2f,50.

Quenstedt. *Petrefactenkunde...* Paléontologie de l'Allemagne. Leipzig. In-8°. 1re partie, t. VII, fasc. 4. Gastéropodes, p. 465-596, av. un atlas de 6 pl. 20 fr.

Roth. *Allgemeine...* Géologie générale et chimique. Berlin. In-8°. T. II, 1re partie: Généralités et roches éruptives anciennes, 210 p. 7f,50.

Scheffler. *Die Naturgesetze...* Les lois de la nature et leur liaison avec les principes des sciences abstraites. Leipzig. In-8°. 3e suppl. à la 2e partie, VIII-168 p., av. 3 pl. 3f,75.

Tischler. *Beiträge...* Contributions à l'étude de l'âge de la pierre dans la Prusse orientale et les régions limitrophes. Kœnigsberg. In-4°, 32 p. 1f,90.

Tschermak. *Die mikroscopische...* La constitution microscopique des météorites exposée sur des figures photographiques. Stuttgart. In-4°. 1re livraison, 12 p., av. 8 pl. 20 fr.

Wæhner. *Das Erdbeben...* Le tremblement de terre d'Agram du 9 novembre 1880. Vienne. In-8°, 332 p., av. 2 cartes, 2 pl. et 17 fig. 8f.75.

Weyr. *Die Elemente...* Les éléments de la géométrie projective. Fasc. 1. Vienne. In-8°, IX-231 p. 7f,50.

Graefe. *Vorlesungen...* Leçons sur la théorie des quaternions avec application à la théorie générale des surfaces et des lignes à double courbure. Leipzig. In-8°, IV-164 p. 4f,50.

Puchta. *Ueber gewisse...* Sur certaines courbes et surfaces d'ordre

supérieur qui peuvent s'engendrer mécaniquement. Vienne. In-8°, 20 p., av. 2 pl. 1f,50.

SCHIMANN. *Petrographische Studien*... Études pétrographiques sur les roches volcaniques du Japon. Halle. In-8°, 62 p. 1f,25.

TUMLIRZ. *Die elektromagnetische*... La théorie électromagnétique de la lumière. Leipzig. In-8°, VIII-158 p. 4f,50.

K.-A. ZITTEL. *Die Sahara*... Le Sahara, sa constitution physique et géologique. Cassel. In-4°, III-42 p. 15 fr.

BUSLEY. *Die Schiffsmachine*... Les machines de bateaux, leur construction, leur mode d'action et leur emploi. Kiel. In-8°. 1re partie, VIII-240 p., av. 30 pl. 12f,50. — 2e partie, p. IX-XX et 241-507. 15 fr.

DÜRRE. *Die Anlage*... Établissement et exploitation des usines à fer. Leipzig. In-4°. 16e livraison (T. II, p. 65-96, av. 6 pl.) 7f,50.

GRAETZ. *Die Electricität*... L'électricité et son emploi à l'éclairage, au transport des forces, à la métallurgie, la téléphonie et la télégraphie. Stuttgart. In-8°, XIV-348 p. 8f,75.

MEISSNER. *Die Kraftübertragung*... Le transport des forces à grandes distances et la construction des machines et des régulateurs, pour les constructeurs, les fabricants et les industriels. Iéna. Livraisons 2-5. T. I, p. 65-320, av. 18 pl. Chaque livraison 3f,75.

BEERINGER. *Kritische Vergleichung*... Comparaison critique du transport électrique des forces par les moyens mécaniques les plus usités. Berlin. In-8°, V-104 p. 3 f.

HERRMANN. *Der Reibungswinkel*. L'angle de frottement. Brunswick. In-4°, 25 p. 3f,15.

LUEGER. *Theorie der Bewegung*... Théorie du mouvement de l'eau de fond dans les alluvions des cours d'eau. Stuttgart. In-8°, VII-67 p. 2f,50.

MACH. *Die Mechanik*... Exposé critique historique du développement de la mécanique. Leipzig. In-8°, X-483 p. 10 fr.

PÜTSCH. *Die Sicherung*... Les moyens de garantir les ouvriers contre les dangers qui menacent leur vie et leur santé dans les fabriques. Berlin. In-8°. 2e demi-volume, p. XVII-XXX et 145-379. 8f,75.

UHLAND. *Handbuch*... Manuel du constructeur de machines. Leipzig. In-4°. Livr. 30-34. Chaque livraison 3f,75.

—— *Das elektrische Licht*... La lumière électrique et l'éclairage électrique. Leipzig. In-8°. Livraisons 1 et 2, p. 1-96. 2 fr.

BEERINGER. *Schematische Darstellung*... Exposé schématique des machines électrodynamiques. Nüremberg. In-f°, 2 f. 10 fr.

BIEHRINGER. *Die Wirkungsweise*... Le mode d'action des machines électro-dynamiques. Nüremberg. In-8°, 21 p., av. 1 pl. 1f,90.

CRAMER. *Beiträge*. Contributions à l'histoire de l'exploitation des mines dans la province de Brandebourg. Halle. In-8°. 7e fascicule, VI-128 p. 3f,50.

Handbuch der chemischen... Manuel de technologie chimique, composé et publié par *P.-A. Bolley*, en collaboration avec plusieurs savants et praticiens; continué après sa mort par *K. Birnbaum*. Brunswick. In-8°. T. V, 5e livraison, p. 946-1177. 6f,90.

KLEBS. *Gewinnung*... Exploitation et emploi de l'ambre. Kœnigsberg. In-8°, 37 p., av. figures. 10 fr.

KOHLFÜRST. *Die elektrischen Einrichtungen*... Les appareils électriques des chemins de fer et les signaux. Vienne. In-8°, VIII-327 pages, av. 130 fig. 3f,75.

KRÆMER. *Die elektrische Eisenbahn*... Le chemin de fer électrique au point de vue de sa construction et de son exploitation. Vienne. In-8°, XIV-267 p., av. 105 fig. et 2 pl. 3f,75.

MORGENSTERN. *Einrichtungen*... Appareils et dispositions pour protéger les ouvriers employés dans les établissements industriels contre les dangers qui menacent leur vie et leur santé. Leipzig. In-8°, 2e partie, p. XIII-XXII et 133-300, av. 132 fig. 5f,65.

RÜHLMANN. *Vorträge*... Leçons sur l'histoire de l'étude théorique des machines et des sciences mathématiques qui s'y rattachent. Brunswick. In-8°. 2e moitié, 1er fascicule, p. 193-400. 7f,50.

v. EHRENWERTH. *Die Regenerirung*... La régénération des gaz du gueulard des hauts-fourneaux. Leipzig. In-8°, 53 p., av. 1 pl. 2f,50.

Freibergs Berg und Hüttenwesen... Mines et usines de Freiberg: courte exposition de leurs conditions orographiques, géologiques, historiques et administratives; publié par l'union des mineurs de Freiberg. Freiberg. In-8°, VIII-284 p., av. 10 pl. 8f,75.

FREUDENBERG. *Die auf der Bleihütte*... Les systèmes employés à l'usine à plomb d'Ems pour recueillir les poussières. Ems. In-8°, 30 p., av. 3 pl. 3f,15.

HAUCK. *Die Grundlehren*... Les principes de l'électricité, avec considération spéciale de ses applications pratiques. Vienne. In-8°, XVI-277 p., av. 83 fig. 3f,75.

LEDEBUR. *Handbuch*... Manuel de la sidérurgie. Leipzig. In-8°. 2e partie, p. 289-632. 16f,25.

PIELER. *Ueber einfache*... Sur des méthodes simples pour contrôler l'aérage des mines. Aix-la-Chapelle. In-8°, 19 p. 1f,25.

HEINZERLING. *Die Brücken*... Les ponts actuels. Leipzig. In-f°. 4e partie, VIII-62 p., av. 87 fig. et pl. 22f,50.

PIEDBOEUF. *Pretroleum*... Le pétrole de l'Europe centrale, ses gisements, et considérations sur l'industrie du pétrole en Allemagne. Düsseldorf. In-8°, 75 p., av. 7 pl. 3f,75.

WIRTH. *Die Armington*... La machine à vapeur Armington. Vienne. In-8°, 23 p. 2 fr.

SALABA. *Die graphische*... Détermination graphique des régulateurs à force centrifuge à énergie maxima. Prague. In-4°, 17 p., av. 1 pl. 2f,25.

OUVRAGES ITALIENS.

ASCHIERI. *Geometria*... Géométrie projective et descriptive. Milan. In-8°. T. I. VIII-355 p., av. 93 fig. 7f,50.

Atti del Comitato... Acte du comité d'Ossola pour le percement du Simplon. Domo d'Ossola. In-4°, 10 p.

BOTTERO e MAGISTRELLI. *Il telefono*... Le téléphone. Turin. In-16, XII-107 p. 2 fr.

CASAZZA. *La legge*... La loi de position, ou la loi des lois physiques. Mortara. In-8°, 84 p. 1f,75.

CATTABENI. *Del moto*... Du mouvement initial et final des trains. Ancône. In-4°, 23 p.

DEL TORRE. *Sopra la formazione*... Sur la formation des tubercules ferrugineux des eaux potables. Rome. In-8°, 12 p.

D'OVIDIO. *Le proprietà*... Les propriétés fondamentales des surfaces du second ordre, étudiées sur l'équation générale du second degré, en coordonnées cartésiennes. Turin. In-8°, X-173 p. 4 fr.

ERMACORA. *Sopra un modo*... Sur une manière d'interpréter les phénomènes électrostatiques: essai sur la théorie du potentiel. Padoue. Gr. in-8°, XL-468 p.

GALLI. *Le correnti*... Les courants électriques du sol; étude préliminaire. Rome. Gr. in-8°, 34 p. (Extr. des *Atti del terzo Congresso geogr. internazionale*).

PIGORI. *Cenni*... Renseignements sur le progrès des études physiques dans ces derniers temps. Parme. In-4°, 72 p.

Relazione seconda... Deuxième rapport au ministre des travaux publics, Direction des chemins de fer, sur les études de la commission chargée d'obtenir l'uniformité et l'amélioration des types d'armature et de superstructure des voies ferrées. Rome. In-4°, 48 p.

ADAMI. *Sulla classificazione*... Sur la classification et la comparai-

son des fers et des aciers. Rome. In-8°, 94 p. (Extr. du *Giornale di Artiglieria e Genio*).

GIANNETTI. *Lavori*... Travaux de chimie agricole, exécutés dans le laboratoire de chimie agricole annexé au laboratoire de chimie pharmaceutique de l'Université de Sienne, en 1882. Sienne. In-8°, 14 p.

MARCHESE. Notes sur les mines de cuivre de l'arrondissement de Puget-Théniers, appartenant à la Société française des mines de cuivre. Gênes. In-8°, 51 p.

AMADORI. *Trisezione*... Trisection d'un angle quelconque au moyen de la règle et du compas; synthèse élémentaire. Savone. In-32, 27 p., av. 1 pl. 1 fr.

COCUCCIO. *La trisezione*... La trisection de l'angle ou de l'arc; réflexions. Acireale. Gr.-in-8°, 32 p.

FABRI. *Impressioni*... Impressions de l'Exposition d'électricité à Paris. Santagata-Feltria. In-16, 140 p.

MORERA. *Sulle proprietà*... Sur les propriétés invariantes du système d'une forme linéaire et d'une forme bilinéaire alternées. Turin. In-8°, 23 p.

PINELLI. *Breve espozioni*... Courte exposition de la théorie des erreurs d'observation (méthode des moindres carrés). Gênes. In-8°, 54 p.

GILLIOLI HILLYER. *La scoperta*... Découverte d'une fausse abyssale dans la Méditerranée. Rome. In-8°, 48 p. (Extr. des *Atti del terzo Congresso geogr. internazionale*).

BOVIO. *La geologia*... La géologie de l'Italie méridionale au point de vue du caractère de ses habitants. Naples. In-8°, 31 p. 1 fr.

FERRETTI. *Il tramway*... Le tramway funiculaire de Recoaro. Vicence. In-16, 16 p. 1 fr.

FERRINI. *Cinque conferenze*... Cinq conférences sur l'éclairage électrique. Milan. In-8°, 68 p.

TALOTTI. *Manuale*... Manuel pratique de voltimétrie. 3° édition. Bologne-Modène. In-32, 240 p. 4 fr.

TARAMELLI. *Di un giacimento*... D'un gisement d'argiles pliocènes fossilifères récemment découvert près de Taino à l'est d'Angera. Milan. In-8°, 10 p. (Extr. des *Rendiconti del R. Istit. Lombardo*).

—— *Sorgenti*... Sources et cours d'eau dans les préalpes. Milan. In-8°, 9 p. (Extr. du même recueil).

—— *Geologia*... Géologie des provinces vénitiennes, avec cartes géologiques et coupes. Rome. In-4°, 231 p., av. 5 pl. (Ext. des *Mem. della R. Accad. dei Lincei*).

CAFICI. *La formazione*... La formation miocène du territoire de

Licodia-Eubea (prov. de Catane). Rome. In-4°, 38 p., av. 3 pl. (Ext. du même recueil).

SEGUENZA. *Studii geologici*... Etudes géologiques et paléontologiques sur le crétacé moyen de l'Italie septentrionale. Rome. In-4°, 150 p., av. 21 pl. (Extr. du même recueil).

TUCCIMEI. *Sulla struttura*... Sur la structure et les terrains de la chaîne de Fara dans la Sabine. Rome. In-8°, 26 p.

BALDACCI. *Alcune osservazioni*... Quelques observations sur le tremblement de terre survenu à l'île d'Ischia le 28 juillet 1883. Rome. In-8°, av. 1 pl.

DE ZIGNO. *Sui vertebrati*... Sur les vertébrés fossiles des terrains mésozoïques des Alpes de Vénétie. Padoue. In-4°, 12 p.

DI STEFANO. *Sopra alcuni fossili*... Sur quelques fossiles du tithonique inférieur de Sicile. Palerme, In-4°, 32 p., av. 3 pl.

FORESTI. *Contribuzione*... Contribution à la conchyliologie tertiaire italienne; second mémoire. Bologne. In-4°, 15 p., av. 8 pl. (Extr. des *Mem. dell' Accad. d. scienze dell' Istit. di Bologna*).

PARONA. *Esame*... Examen comparatif de la faune des couches pliocènes de Lombardie. Milan. In-8°, 12 p. (Ext. des *Rendiconti del R. Istit. Lombardo*).

PARONA e CANAVARI. *Brachiopodi*... Brachiopodes oolithiques de quelques localités de l'Italie septentrionale. Pise. (In-4°, 20 p., av. 3 pl. (Extr. des *Mem. della Soc. toscana d. scienze naturali*).

PIOLTIS e PORTIS. *Il calcare*... Le calcaire du Mont-Thabor (Piémont). Turin. In-8°, 6 p., av. 1 pl. (Extr. des *Atti della R. Accad. d. scienze di Torino*).

SCACCHI. *Della lava*... De la lave du Vésuve de l'année 1631. 1er mémoire. Naples. In-8°, 48 p. av. 2 pl. (Extr. des *Mem. della soc. Italiana delle scienze*).

SILVESTRI. *Sulla eruzione*... Sur l'éruption de l'Etna du 22 mars 1883; rapport au Gouvernement. Catane. In-8°, 8 p.

BRANDANI. *Contributo*... Contribution à la question des armatures métalliques pour les chemins de fer nationaux. Milan. In-8°, 37 pages.

CAPELLINI. *Di un' orca*... Sur un épaulard fossile découvert à Catone en Toscane. Bologne. In-4°, 23 p. av. 4 pl.

Espozione industriale... Exposition industrielle de 1881 à Milan. Rapports des jurés. — Les industries chimiques: produits chimiques; par le prof. *A. Pavesi*.

Il terremoto... Le tremblement de terre du 28 juillet 1883 et la destruction de Casamicciola dans l'île d'Ischia. Codogno. In-32, 15 pages.

CAFIERO. *Attività...* Activité sismique de l'Etna du 20 mars à la fin de juin 1883; rapport. Giarre. In-8°, 16 p.

GABBA. *Trattato...* Traité élémentaire de chimie inorganique et organique. Milan. In-16, VIII-534 p. et 1 pl. 5 fr.

MERCALLI. *Sull' eruzione...* Sur l'éruption de l'Etna du 22 mars 1883. Milan. In-8°, 12 p.

RINDI. *Delle superficie...* Des surfaces polaires inclinées. Pise. In-8°, 36 p.

MIRANDOLI. *Le locomotive...* Les locomotives routières, étude technique et militaire. Rome. In-8°, IX-77 p., av. 3 pl. (Ext. de la *Rivista militare Italiana*).

PALMIERI. *Nuove lezioni...* Nouvelles leçons de physique expérimentale et de physique terrestre. Naples. In-16, XII-895 p. 8 fr.

SALLINO. *Tavole...* Tables de 1 à 5000 mètres pour la mesure des hauteurs au moyen du baromètre, avec les pressions normales par chaque mètre d'élévation et les corrections pour l'influence des rayons vecteurs de la terre, etc. Bellune. In-8°, x p. et 24 p. de tables. 1f,50.

STRONA. *Dimostrazione...* Démonstration de la théorie des parallèles; premier opuscule. Rome. In-16, 24 p., av. 1 pl.

—— *Trisezione...* Trisection de l'angle exécutée avec deux démonstrations différentes. Rome. In-16, 22 p.

BARETTI. *Sunto...* Résumé de ses leçons de géologie. Turin. In-8°, 540 p. 10 fr.

D'ACHIARDI. *I metalli...* Les métaux, leurs minerais et mines. Milan. In-8°. 2 vol., 400 et 625 p. 20 fr.

MASI. *Manuale...* Manuel de cinématique appliquée; nouvelle classification des mécanismes. Bologne. In-8°, VII-253 p., av. 17 pl. 20 fr.

POMPEI. *La materia...* La matière considérée comme une forme d'énergie. Pesaro. In-8°, 68 p., av. planches. 3 fr.

LAMPUGNANI. *Notizie...* Notices et études sur la question de l'exploitation des chemins de fer en Italie. Rome. In-16, 123 p. (Extr. du *Giornale d. Lavori publici e d. Strade ferrate*).

LATTES. *Sulla possibilità...* Sur la possibilité d'instituer en Italie des associations de propriétaires de chaudières à vapeur. Rome. In-4°, 47 p.

ZOPPETTI. *Arte siderurgica...* L'art. de la sidérurgie; notions sur la production de la fonte, du fer et de l'acier. Milan. In-8°. 2 vol., XVI-424 p. et IX-495 p. 31f,25.

ANNALES
DES MINES.

ÉTUDE
SUR LE BASSIN DE FUVEAU
ET SUR
UN GRAND TRAVAIL A Y EXÉCUTER

Par M. VILLOT, Ingénieur en chef des mines.

INTRODUCTION.

L'étude qui va suivre date de l'année 1874 dans sa partie essentielle. Le travail dont il y est parlé paraissant sur le point d'entrer dans la phase d'exécution, on a pensé qu'il y aurait intérêt à en justifier les principales données, et c'est la raison qui motive sa publication.

Le bassin lignitifère, dit de Fuveau, qui s'étend pour sa majeure partie dans le département des Bouches-du-Rhône, mais qui a occupé une bien plus grande surface, constitue, avec celui de Manosque et Forcalquier dans les Basses-Alpes, beaucoup plus récent que le premier, les deux bassins ligni-

tifères véritablement importants de la France méridionale. La position du premier aux portes de notre premier port de commerce, les facilités que cette situation privilégiée lui crée, pour les débouchés locaux et extérieurs, la qualité exceptionnelle de ses produits en tant que lignites et la régularité admirable du terrain qui contient les couches exploitables, ont depuis longtemps été des éléments sérieux de développement dans cette région carbonifère. Pour en donner une idée il suffira de se reporter aux chiffres ci-dessous qui font connaître, à différentes époques, en regard de la production totale de notre pays, celle du bassin des Bouches-du-Rhône :

ANNÉES.	PRODUCTION des Bouches-du-Rhône (a).	PRODUCTION de la France entière. (b).	RAPPORT $\frac{a}{b}$.
	tonnes	tonnes	
De 1831 à 1840 (moyenne) . . .	38.600	2.453.000	0,016
De 1841 à 1850 (moyenne) . . .	72.190	4.078.000	0,018
De 1851 à 1855 (moyenne) . . .	119.620	5.921.400	0,020
De 1856 à 1860 (moyenne) . . .	140.340	7.834.000	0,018
1861.	148.450	9,395.000	0,016
1862.	156.300	10.317 000	0,015
1863.	188.800	10.706 000	0,018
1864.	190,300	11.201.000	0,017
1865.	176.900	11.600.000	0.015
1866.	181.860	12.260.000	0,015
1867.	191.200	12.739.000	0,015
1868.	197.000	13.254.000	0,015
1869.	242.400	13.464.000	0,018
1870.	249.000	13.330.000	0,019
1871.	220.000	[illegible]	[illegible]
1872.	360.000	15.803.000	0,023
1873.	375.800	17.[illegible].000	[illegible]
1874.	354.000	16.908.000	0,021
1875.	344.000	16.957.000	[illegible]
1876.	364.000	17.101.000	0,021
1877.	394.000	16,806.000	0,023
1878.	419.000	16.961.000	0,025
1879.	431.000	17.111.000	0,025
1880.	458,000	19.362.000	0,024
1881.	459.000	19.909.000	0,023
1882.	457.000	21.000.000 (?)	0,022

La colonne qui donne le rapport $\frac{a}{b}$ montre que la part du bassin de Fuveau, dans la production totale du pays, a

suivi une progression à peu près constamment croissante depuis cinquante ans.

Tandis que dans les autres bassins carbonifères, les difficultés de l'exploitation ont cru dans des proportions notables à mesure que s'approfondissaient les puits d'extraction, par suite de la présence de plus en plus inquiétante, dans un grand nombre d'entre eux, du grisou, et de la nécessité où l'on s'est trouvé d'affronter et de franchir des dérangements considérables et mal connus, le développement dans le bassin à lignite n'a jamais eu à cet égard à lutter contre des difficultés sérieuses. Ce n'est pas que le grisou y soit inconnu, mais il ne s'y est présenté jusqu'à présent, que d'une manière exceptionnelle et peu inquiétante. Ce n'est pas non plus que des failles n'accidentent le terrain, mais elles ne paraissent pas devoir jamais, malgré l'importance de quelques-unes d'entre elles, être la cause de mécomptes sérieux pour les traverser.

Il est par contre une difficulté, compensation malheureuse, qui pèse sur l'exploitation du bassin des Bouches-du-Rhône depuis sa mise en activité et cela avec une intensité de plus en plus marquée et croissante : ce sont les quantités d'eaux formidables contre lesquelles, à certains moments, les exploitants ont à lutter. L'épuisement dans le bassin de Fuveau est donc, et de beaucoup, la question qui tient le plus de place dans les préoccupations des exploitants et du service des mines qui a la surveillance de ce bassin.

Le présent travail a pour objet de faire connaître d'une manière générale les traits caractéristiques qui distinguent les solutions successivement adoptées pour parer aux dangers créés par les venues d'eaux, et d'exposer d'une manière détaillée celle à laquelle on s'est arrêté dans ces derniers temps pour les combattre de la manière la plus radicale possible. Préalablement à ces deux chapitres, il m'a paru intéressant de donner un aperçu géologique de

la formation de Fuveau elle-même, d'après les travaux du savant géologue qui s'en est le plus occupé et d'insister sur les caractères qui spécialisent cet ensemble au point de vue du régime des eaux.

CHAPITRE Ier.

§ 1er. — *Aperçu sur la classification géologique du bassin de Fuveau.*

Quand on jette un coup d'œil sur une carte géologique générale, comprenant le département des Bouches-du-Rhône à une assez grande échelle, la carte de M. Matheron, par exemple, qui dès 1843 avait parfaitement délimité les masses sous des appellations qui ont pu changer sans nuire à l'exactitude matérielle des limites tracées, on voit se diriger de l'est à l'ouest la vallée de l'Arc. Elle est limitée de tous côtés, sauf à l'ouest où l'étang de Berre termine son thalweg, par des hauteurs formées, à l'exception d'une lacune de quelques kilomètres dont je reparlerai, par des terrains secondaires marins bien caractérisés qui se profilent en hauteurs plus ou moins abruptes sous les noms de chaînes de la Fare et de Sainte-Victoire au nord, mont Olympe à l'est, et chaîne de l'Étoile au sud (Pl. II, *fig.* 1).

Ce vaste golfe est rempli par un ensemble d'une épaisseur énorme de dépôts, les uns marins, les autres saumâtres ou d'eau douce; partant chronologiquement du calcaire à hippurites (étage *Provencien* de Coquand), largement développé à l'auberge de la Pomme, ces dépôts s'élèvent dans la série géologique par des stratifications d'une parfaite concordance jusqu'à des couches constituant le fond de la vallée de l'Arc, aux environs des Milles, et qui sont formées principalement par des argiles et marnes rougeâ-

tres et des poudingues à éléments variés. Ces couches des Milles sont ce que l'on connaît de plus récent dans la vallée de l'Arc; elles occupent précisément cette lacune de quelques kilomètres dont je parlais plus haut dans la ceinture secondaire qui limite au nord le bassin de Fuveau, et qu'on peut appeler le détroit d'Aix ou des Milles. Elles marquent le début d'une période de sédimentation qui diffère d'une manière bien tranchée de la période antérieure : en effet les couches qui en forment la base reposent en stratification discordante et transgressive sur les assises antérieures jurassiques, néocomiennes ou fuvéliennes, et elles ont rempli un grand lac au nord de la chaîne de La Fare, entre celle-ci et la chaîne du Luberon (Vaucluse).

La formation dite des lignites de Fuveau est comprise dans ce vaste ensemble.

Avant de l'examiner au point de vue spécial de cette étude, je donnerai sous forme succincte quelques détails sur les travaux auxquels a donné lieu sa place dans la série géologique.

Les auteurs de la carte géologique de France avaient, comme on le sait, rangé toute cette masse de dépôts dans le miocène, mais cette opinion n'avait pas tardé à être battue en brèche par les géologues provençaux, et depuis longtemps elle était considérée comme insoutenable. M. Matheron l'avait dès l'abord condamnée. M. de Villeneuve (*) déclarait qu'on doit considérer le terrain à lignite de Fuveau comme antérieur à l'argile plastique de Paris, et l'on synchronisait au cours de paléontologie de l'École des mines en 1855, les lignites de Fuveau avec les sables de Bracheux et les calcaires de Rilly. Mais c'était encore les rajeunir et il est incontestable maintenant qu'une partie de ce grand

(*) *Description géologique et minéralogique du Var*, 1856, page 197.

ensemble représente la partie supérieure du terrain crétacé. Ce résultat solidement acquis à la science est dû en totalité à M. Matheron, et c'est en 1864, à la réunion extraordinaire de la société géologique, à Marseille, que ce savant a pour la première fois donné la publicité à cette déduction capitale de ses remarquables et persévérantes études. Maintenant que l'on s'est fait à cette idée, elle n'a plus l'apparence de hardiesse qu'on a pu être tout d'abord disposé à lui attribuer. Il n'en est pasmoins vrai que, ainsi que l'on peut s'en assurer (*), ce n'est en quelque sorte que par approximations successives que le savant géologue de Marseille est arrivé à formuler le résultat dans ses traits principaux. Pour ce qui est des assimilations de détail, la question reste et restera même longtemps, sinon toujours, ouverte. Et il résulte aussi de cela, comme des formes de plus en plus précises qu'a revêtues la pensée du géologue précité qu'il est assez long et fastidieux comme recherches, de condenser l'argumentation dans ses points principaux; c'est pour cela qu'il a paru que le résumé qui va suivre pouvait être d'un certain intérêt pour les lecteurs de ce recueil.

Depuis le calcaire à hippurites, horizon parfaitement bien connu (partie supérieure du Turonien de d'Orbigny ou Provencien de Coquand) jusqu'au terrain sextien contenant les gypses d'Aix, autre horizon aujourd'hui non moins incontesté, et que depuis longtemps on synchronise avec cette partie gypseuse de la série parisienne commençant par les grès de Beauchamp pour finir aux calcaires de la Beauce, l'ensemble des couches en stratification concordante que l'on rencontre dans le bassin de Fuveau, représente nécessairement tous les dépôts qui, dans le nord de la France, se sont accumulés dans le même intervalle de temps. Il suit

(*) *Recherches comparatives sur les dépôts fluvio-lacustres des environs de Montpellier, de l'Aude et de la Provence.* Société d'émulation de Provence, 1862.

de là que cet ensemble ne peut pas ne pas correspondre successivement avec toutes les divisions acceptées par les géologues de tout pays dans la série comprise entre ces deux limites. Le problème consistera dans les divisions logiques et rationnelles à établir dans ce vaste ensemble afin de réaliser les assimilations terme à terme. La concordance de stratification étant d'ailleurs incontestable sur une énorme épaisseur, il faudra nécessairement faire un appel exclusif ou presque exclusif aux caractères paléontologiques par la comparaison des formes locales avec celles d'autres lieux où le synchronisme des étages pourra être saisi.

Rappelons d'abord comment se partage en différents groupes naturels et locaux la série comprise entre le provencien et les poudingues et marnes rouges de la vallée de l'Arc. L'assimilation terme à terme avec les groupes connus suivra cette énumération.

Le groupe qui repose immédiatement sur les hippurites et dont l'origine est encore marine mais de mer peu profonde, est l'étage santonien de Coquand, autrement dit la craie du plan d'Aups; partout où l'on peut l'observer en Provence il contient de faibles dépôts de lignite que des tentatives malheureuses d'exploitation ont fait depuis longtemps connaître. Il est caractérisé paléontologiquement par de nombreux fossiles parmi lesquels l'*Ostrea acutirostris* constitue parfois des bancs entiers; elle est accompagnée par la *Rhynchonella difformis*, le *Cyclolites elliptica*, la *Turritella Coquandiana*, la *Crassatella macrodonta*, la *Janira quadricostata* et une foule d'autres. Au-dessus de ces bancs encore marins, des eaux saumâtres d'abord, douces ensuite, se sont substituées définitivement aux eaux salées et ont fait apparaître des formes nouvelles.

C'est un ensemble de couches marneuses et argileuses de 80 mètres d'épaisseur environ à la Pomme, dont le fossile le plus abondant est le *Melanopsis gallo-provincialis*. Le

nom de valdonnien lui est attribué par M. Matheron (*), en ayant soin de remarquer qu'il n'attache à ce nom, ainsi qu'à ceux de fuvélien et de vitrollien qu'il adopte également pour d'autres groupes plus élevés, aucun caractère de généralité doctrinale, ces noms n'ayant d'autre objet que de faciliter le discours.

Par-dessus ces strates un paquet de couches essentiellement calcaires, bien qu'elles admettent des intercalations marneuses et argileuses, est proprement dit le groupe à lignite ou fuvélien. C'est lui qui renferme en son sein les bancs de combustibles exploités activement dans le bassin des Bouches-du-Rhône, et aussi ceux de calcaires argileux fournissant le ciment si connu sous le nom de ciment de la Valentine. L'épaisseur totale de ce groupe dépasse 200 mètres en y comprenant des bancs de calcaires surmontant la dernière couche de lignite à peu près inexploitable, dite couche de Fuveau ou de Gréasque, du nom des deux villages qu'avoisine son affleurement. Paléontologiquement ils sont caractérisés par une profusion de fossiles que M. Matheron a en partie décrits, il y a bien longtemps, et au milieu desquels on distingue des cyrènes striées formant des bancs entiers que les mineurs désignent sous le nom de clovisseux. Des mélanies, des unios et des débris de carapaces de tortues s'y joignent et donnent à cette faune l'aspect le plus tranché.

Au-dessus, toujours en concordance, mais avec un facies pétrographique et fossilifère absolument différent, se développent des couches d'abord marneuses bleuâtres auxquelles se mêleront peu à peu pour devenir prépondérants des bancs de grès et d'argiles. C'est la région des physes et des cyclostomes. Les bancs de grès sont parfois assez

---

(*) *Recherches paléontologiques dans le midi de la France*. (En cours de publication.)

durs et assez fins pour servir de meules ; un banc de charbon (couche de Bidaou) et des bancs de pisolithes, à peu de distance au-dessus de lui, achèvent de donner à ce paquet une physionomie bien reconnaissable. Tout ce système se trouve couronné par un banc épais et solide de couleur blanche ou gris clair contenant des graines de *Chara*, et qu'on désigne sous le nom de calcaire de la fabrique de soude, à cause d'un établissement industriel dont les ruines se voient à l'ouest de la route d'Aix, et reposent sur ce couronnement. On peut attribuer à ce nouveau groupe une épaisseur de 350 mètres et lui donner les noms de groupe des Physes, de la Bégude, de Bidaou. Pour entrer dans la voie ouverte par M. Matheron et avec les mêmes restrictions, on ne verrait aucun inconvénient à le qualifier de Bégudien.

Sur lui s'appuie un nouveau massif argileux ou gréseux dans sa partie inférieure, calcaire en assises puissantes au-dessus. Les argiles grises, roses, bigarrées sont remarquables par les restes de reptiles décrits par M. Matheron (*); les calcaires, par la présence d'une coquille terrestre voisine des *Helix* (*Lychnus*) et que le même savant a fait connaître pour la première fois dans son catalogue des corps organisés fossiles des Bouches-du-Rhône. A ce genre remarquable sont associés des cyclostomes, des bulimes, des bithynies et des mélanies, notamment la *Melania armata*, et enfin des Paludines, particulièrement la *Paludina Beaumontiana*. C'est le groupe dit de Rognac, le Rognacien pourrait-on dire. Comme fait intéressant à noter il faut citer la présence au sein de la partie calcaire de ce groupe de quelques bancs marneux et de trois petites veines de charbon, qu'on a tenté de mettre en valeur dans les environs de Châteauneuf-le-Rouge. L'ensemble des argiles et de la masse solide qui les surmonte ne mesure pas moins de 350 mètres d'épaisseur, dont 270 à 280 mètres pour les argiles.

(*) *Mémoires de l'Académie de Marseille*, 1869.

Au-dessus du groupe précédent arrive un nouveau système qui a comme composition minéralogique une grande analogie avec le précédent : argiles et marnes inférieures admettant des lits de calcaires marneux solides, le tout couleur rouge foncé, et surmonté d'une très importante masse calcaire. Ce groupe parfaitement développé auprès du petit village de Vitrolles, à l'est de la grande voie ferrée et au nord de la Nerthe, a reçu de M. Matheron le nom de Vitrollien. Il constitue l'un des traits les plus saillants dans l'orographie de la vallée de l'Arc. D'un point quelconque de cette vallée, en effet, lorsqu'on observe le massif de Sainte-Victoire, on voit accolé à mi-hauteur de cette chaîne jurassique un plateau de forme grossièrement ovale qui semble couronné par une masse abrupte calcaire buttant contre les flancs de la chaîne secondaire. Cette corniche est ce que l'on nomme la barre du Cengle; elle n'est pas le dernier terme de la série stratigraphique accolée à Sainte-Victoire, mais les couches qui la surmontent sur le méridien du village de Saint-Antonin forment comme une calotte très surbaissée, et toute cette masse constitue ce qu'on appelle la montagne du Cengle. Lorsqu'on la suit de l'œil vers l'est, on la voit perdre peu à peu son caractère âpre et son aspect d'ouvrage avancé; les pentes beaucoup plus douces qui y font suite dans la direction de Puyloubier et de Pourrières sont en effet formées par les étages inférieurs. A l'ouest, au contraire, l'étage vitrollien prend un développement de plus en plus considérable; des barres importantes naissent au sein des marnes rouges et, traversant, aux défilés de la Galante et de Langesse, la route de Marseille à Aix, envahissent le plateau formant la rive gauche de l'Arc. C'est sur une de ces barres, partie supérieure du plateau d'Arbois, que sont appuyées les culées de l'aqueduc de Roquevafour. M. Matheron cite comme forme spéciale à ce niveau *Physa prœlonga* et *Draparnaudi*, *Planorbis subcingulatus* et *Lymnœa obliqua*. C'est un nouveau terme

dans cette grande série dont la classification nous occupera tout à l'heure. Toutefois on reconnaît qu'entre lui et d'autres calcaires qui le surmontent, en différant peu comme aspect et formant la colline du Montaiguet, il y a un passage d'espèces et une analogie de formes que l'existence du *Strophostoma lapicida*, depuis la corniche du Cengle jusque dans les bancs supérieurs du Montaiguet accuse d'une manière très marquée. Les *Bulimus Hoppei* et *B. Subcylindricus*, la *Lymnœa aquensis*, le *Planorbis pseudo-rotundatus* et le *Pupa subantiqua* sont les espèces qu'on rencontre le plus fréquemment dans ces bancs de Montaiguet. Il ressort de là que le vitrollien doit être entendu de toute cette masse qui, partant des argiles de Châteauneuf-le-Rouge, comprend le Cengle et la montagne de Montaiguet.

Toutefois avant d'entamer les poudingues et argiles occupant le détroit d'Aix ou des Milles on peut distinguer assez naturellement une dernière assise de calcaire blanc ou blond dont les tranches se voient au voisinage de la route d'Aix près du pont dit des Trois-Sautets. Les fossiles que M. Matheron a distingués à ce niveau supérieur qui couronne la grande masse calcaire du bassin de Fuveau, sont entre autres la *Lymnœa Michelini*, le *Planorbis Leymeriei*, l'*Achatina Marioni*, espèce nouvelle voisine de l'*Achatina Nodoti* des environs de Nogent-sur-Seine.

Tout cet ensemble disparaît aux environs d'Aix sous l'épais manteau des poudingues et marnes rouges qui lui-même plonge sous le terrain à gypse, dont les carrières des environs de la ville montrent les bancs en exploitation. A son tour celui-ci s'enfonce sous la mollasse marine.

Ces deux derniers termes de la série classique étant connus au point de vue du synchronisme, abordons, en prenant toujours pour guide le savant géologue de Marseille, la recherche des assimilations des groupes ci-dessus décrits, et, supprimant les étapes successives ainsi que les détails circonstanciés, donnons surtout une idée de la méthode telle

qu'elle peut être saisie dans l'ensemble des publications de M. Matheron.

Le midi de la France considéré dans son ensemble, Provence et région pyrénéenne, renfermant en même temps que les dépôts lacustres à analyser leurs représentants marins et notamment le plus important d'entre eux, le grand terrain nummulitique, cette région doit, semble-t-il, renfermer le nœud de la question, au moins pour les grands traits, et ce nœud sera saisi au contact de la mer nummilitique envahissant les régions jusqu'alors lacustres, avec le terrain immédiatement inférieur.

Or à Montolieu, dans l'Aude, sur le versant méridional de la montagne Noire, on constate au-dessous du terrain nummulitique une succession formée de deux paquets de couches différentes; le supérieur est constitué par une barre calcaire d'une cinquantaine de mètres d'épaisseur dans laquelle on rencontre un horizon fossilifère de grandes physes analogues et contenant des espèces identiques à celles de l'étage vitrollien à la hauteur du Cengle, ou des barres calcaires (Langesse) contenues dans cet étage. On peut citer notamment la *Physa prisca*, extrêmement abondante à Montolieu. On cite aussi le *Cyclostoma Braunii*. Par-dessous ce paquet supérieur des argiles sableuses colorées occupent par rapport à la masse calcaire la position des argiles rutilantes de Châteauneuf-le-Rouge. Cette analogie dans les formes, cette identité pour quelques-unes, la similitude de facies autorisent M. Matheron à considérer le groupe de Montolieu comme synchronique du Vitrollien, et à voir dans celui-ci ce qu'il y a de plus élevé dans la série crétacée des Bouches-du-Rhône. Ce sera l'équivalent de la partie supérieure et moyenne du garumnien, ce terrain auquel M. Leymerie, a donné ses lettres de naturalisation dans la série classique.

Mais si l'on sait assez bien comment débute le Vitrollien (argiles rouges de Châteauneuf), il est moins aisé d'en fixer

la limite supérieure sans sortir du bassin. On a dit plus haut que les formes étaient fort analogues, sur une grande épaisseur, que le *Strophostoma lapicida* régnait depuis la barre du Cengle jusque dans les couches élevées du calcaire de Montaiguet. Il y a là une limite douteuse à placer et cependant, remarquons-le en passant, c'est la limite qu'on peut appeler capitale : c'est la séparation du tertiaire et du crétacé dans le bassin lacustre. Je hasarderai plus bas quelques réflexions à ce sujet.

Ce qui tend dans tous les cas à limiter le champ des recherches, c'est que les calcaires de Cuques ou du pont des Trois Sautets se rapprochent naturellement, par suite de l'analogie fossilifère, du calcaire grossier inférieur du bassin parisien, ce qui les fait devenir contemporains du terrain nummulitique pyrénéen. On arrive ainsi à synchroniser avec les parties tout à fait inférieures du bassin parisien (horizon de Bracheux et de Rilly), la partie du Vitrollien qui se trouve entre la barre du Cengle proprement dite et le calcaire de Cuques, c'est-à-dire ce que M. Matheron a appelé les calcaires du Montaiguet, assimilation qui se soutient assez bien par l'analogie des formes organiques.

Avant d'aborder la série descendante, observons que les marnes, argiles et poudingues rouges de la vallée de l'Arc placés entre l'étage des gypses et les calcaires de Cuques, ne contenant point de fossiles, leur âge se trouve déterminé par leur situation entre le nummulitique lacustre (calcaire de Cuques) et le sextien, contemporain, en gros, des gypses parisiens, et qu'on est, dès lors, conduit à les paralléliser avec les sables de Beauchamp. Remarquons d'ailleurs qu'en Languedoc, un grand dépôt détritique, connu sous le nom de grès de Carcassonne ou d'Issel, se trouve aussi placé de la même manière entre les gypses à Paléothérium du Mas Saintes-Puelles et le terrain nummulitique qui s'appuie sur le versant nord des Petites-Pyrénées et que dès lors les

argiles des Milles se trouvent contemporaines de ces grès.

Reprenons maintenant la série descendante et transportons-nous au-dessous du vitrollien. L'étage de Rognac ou étage à *Lychnus* est doué d'une grande extension et l'on est conduit dès lors à accorder à ce genre une importance sérieuse au point de vue de la classification, surtout quand il se rencontre avec d'autres espèces communes. Or dans la province de Barcelone, M. Vidal, ingénieur au corps des mines d'Espagne, a découvert « dans un seul et même gisement (*) » des fossiles contenant des espèces du garumnien inférieur de la Haute-Garonne (couches d'Auzas) et des espèces identiques à celles de l'étage de Rognac, notamment la *Melania armata.* Cette coïncidence jointe à l'assimilation déjà faite du garumnien supérieur et moyen avec les couches du Cengle proprement dites, permet de mettre sur le même niveau soit les couches de Rognac à *Lychnus* et à *Melania armata*, soit les couches franchement marines d'Auzas, soit celles d'embouchure ou d'eau saumâtre du garumnien catalan, ces dernières formant comme le lien de principe entre les deux types d'eau douce et de mer franche.

Ici une difficulté déjà envisagée plus haut pour l'étage de Vitrolles Où placer la limite inférieure de ce qui, dans la vallée de l'Arc, représentera le garumnien inférieur?

Dans l'énumération des groupes locaux on a vu plus haut qu'entre le groupe des lignites proprement dit ou fuvélien et le rognacien, deux termes distincts ont trouvé leur place, savoir : ce qu'on a appelé l'horizon des physes et des cyclostomes, formé principalement de calcaires bleuâtres passant aux grès et argiles, puis au-dessus de celui-ci, les argiles et grès bégudiens. Or on retrouve des *Lychnus* jusque dans l'horizon des physes ; d'un autre côté

(*) Matheron, *Bulletin de la Société géologique*, 1876, page 421. Leymerie, *Bulletin de la Société géologique*, 1875, page 548.

les cyclostomes sont nombreux jusque dans les portions les plus élevées de la barre de Rognac. Somme toute il ne paraît pas y avoir entre les faunes des deux horizons calcaires séparés par les grès argileux non fossilifères de la Bégude, une différence bien tranchée, et M. Matheron englobe aujourd'hui tout cet ensemble dans le garumnien inférieur.

Arrivons aux étages fuvélien (lignites) et valdonnien.

Au dessous du terrain garumnien d'Espagne on rencontre, d'après M. Vidal, une succession de terrain franchement marins qui commencent par des bancs à *Ostrea larva*, *O. auricularis* et un grand nombre d'autres genres de brachiopodes et d'échinodermes, et qui de proche en proche en descendant conduit à un horizon tout à fait assimilable à celui qui, en Provence, forme la base de l'étage valdonnien. Ce sont des calcaires marneux ou des marnes renfermant avec de nombreuses espèces de Lamellibranches et de Brachiopodes, les *Ostrea Matheroniana*, *Rhynchonella difformis*, *Janira quadricostata*, etc.

Nous reconnaissons dans cette faune le santonien de Coquand (partie inférieure du sénonien de d'Orbigny) qui à la Pomme et au plan d'Aups repose sur le provencien à *Hippurites organisans*. Dès lors la place du valdonnien et du fuvélien est toute trouvée : elle correspond au sénonien supérieur, y compris la craie de Maëstricht. Le groupe inférieur (valdonnien) représentera fort naturellement la région du sénonien caractérisé en Champagne par les micrasters et les inocérames et le fuvélien se placera au niveau de la craie à *Ananchites ovata*, *Belemnitella mucronata*, *Ostrea vesicularis*, etc. de Meudon, en y ajoutant la craie de Maëstricht avec laquelle les chéloniens des bancs voisins de la Grande Mine présentent un trait de ressemblance important à noter.

On peut résumer à grands traits la classification de M. Matheron de la manière suivante :

ÉPAISSEURS approximatives dans la vallée de l'Arc.		SÉRIE PROVENÇALE. (Désignations locales.)			SÉRIE CLASSIQUE.
mètres 200		Terrain sextien.	Gypse d'Aix. Marnes et poudingues des Milles.		Parisien supérieur. Parisien moyen. (Sables de Beaucham[p])
30		Calcaire de Cuques.	*Planorbis Leymerici. Limnæa Michelini Achatina Marioni.*		Parisien inférieur. (Calcaire de Provins.)
100	Vitrollien.	Calcaire du Montaiguet.	*Bulimus Hoppei, Bul. Subcylindricus. Lymnæa Aquensis, Planorbis Subrotundatus.*	*Strophostoma lapicida.*	Calcaires et sables de Bracheux et de Rilly.
30	Vitrollien.	Barre du Cengle.	*Physa prælonga* et *Ph. Draparnaudi.*	*Strophostoma lapicida.*	Garumnien supérie[ur]
200	Vitrollien.	Argiles rutilantes avec argiles de Châteauneuf-le-Rouge. (Petites couches de lignites.)			Garumnien moyen
80	Rognacien.	Calcaire de Rognac, de Gardanne et de Rousset.	*Lychnus, Cyclostomes, Melania armata. Paludina Beaumontiana.*		Garumnien inférie[ur]
270	Rognacien.	Argiles à	*Reptiles.*		
350	Bégudien.	Grès de la Bégude et calcaires de la fabrique de soude (*Chara*) Calcaires à *Physes* et *Cyclostomes* avec *Anostomes* et *Lychnus*. (Couche de lignite de Bidaou.)			
200	Fuvelien.	Calcaire à lignite.	*Cyrènes striées* à profusion, *Unios*, *Carapaces de Chéloniens.*		Craie de Maëstrich[t] (Dordonien de Coqu[and])
80	Valdonnien.	Marnes et argiles.	*Melanopsis.*		Sénonien supérie[ur] (Campanien de Coqu[and])
		Marnes et calcaires marneux. Lignite du Plan-d'Aups. Rognons de fer carbonaté.	*Turritella Coquandiana. Cyclolites elliptica. Ostrea acutirostris. Ostrea Matheroniana. Ostrea Iverna. Rhynchonella difformis*, etc., etc.		Sénonien inférie[ur] (Santonien de Coqu[and])
		Calcaire à *Hippurites organisans.* — Turonien. — Provencien de Coquand.			

Qu'on nous permette maintenant les quelques réflexions suivantes :

La classification qui précède est, on le voit, fondée à peu près exclusivement sur des analogies de formes organiques combinées avec des rapprochements pétrographiques ingénieux, mais tout cela ne s'impose pas, semble-t-il, à l'esprit, avec une rigueur déductive et l'éclat de l'évidence. Il ne faut pas s'en étonner outre mesure. On se demande même si cela présente philosophiquement un véritable intérêt pour l'école actuelle. On est ici en présence de faunes qui, sauf quelques exceptions comme les *Lychnus* par exemple, ont un caractère local et ne peuvent offrir avec les séries classiques que des points de contact relativement rares. Les points où le doute n'est pas possible (limites supérieure et inférieure de la série à classer), comme aussi ceux pour lesquels les déductions statigraphiques pures participent à l'argumentation (superposition du nummulitique sur le vitrollien) sont autant de points de repère qu'on peut considérer comme acquis. Que maintenant il soit impossible en l'état de fixer tel ou tel plan de séparation, spécialement celui qui sépare l'époque crétacée de l'époque tertiaire, l'école actuelle ne songe plus trop à s'en étonner, puisque il est accepté et professé que les dislocations sont fréquemment des accidents locaux n'ayant point de rapport avec les séparations des époques, et que l'idée de continuité dans les périodes géologiques, tend de plus en plus à régner dans la science. Je tiens à garder ici le rôle de simple rapporteur.

Un dernier mot sur ce sujet : lorsque l'on observe qu'entre le dépôt du calcaire de Cuques et celui des marnes et poudingues des Milles, il y a eu incontestablement un mouvement important de bascule qui a émergé tout le bassin de l'Arc et fait passer par le détroit des Milles toutes les eaux du lac de Fuveau, au nord de la chaîne de La Fare ; quand on constate que le nouveau dépôt a com-

mencé par des conglomérats et des poudingues, indices de mouvements violents, et a inauguré ainsi une période de sédimentation n'ayant rien de commun avec la précédente, au moins dans la région considérée, on serait disposé, en restant fidèle à des idées qui régnaient à peu près sans partage dans la science, il y a vingt ou trente ans, à croire qu'on a saisi là le phénomène qui a mis fin dans nos contrées à la période crétacée; la similitude de quelques formes du calcaire de Cuques avec d'autres dépôts de Saint-Parres et de Provins, paraîtrait de bien minime importance en regard d'un mouvement de l'écorce pris, on peut le dire, sur le fait, et le calcaire de Cuques rentrerait dans la masse du Montaiguet et du Cengle, dont rien comme pétrographie et gisement ne semble le détacher. On ne peut s'empêcher de remarquer ici l'analogie qui existe, toute proportion gardée, entre ce cas et celui du terrain nummulitique participant au soulèvement des Pyrénées et au pied duquel les sédiments de la plaine du Languedoc se sont déposés.

§ 2. — *Caractères du bassin de Fuveau au point de vue hydrologique.*

Si, d'après ce qui a été dit plus haut de la composition des divers étages du grand lac dans lequel se sont déposées les couches dont il vient d'être parlé, on cherchait à se faire une idée *à priori* du régime des eaux dans le bassin qu'elles ont rempli, on serait conduit aux considérations suivantes :

L'ancienne vallée de l'Arc est un bassin complètement fermé aujourd'hui par des hauteurs de calcaires secondaires, sauf le détroit d'Aix, dont j'ai déjà parlé, et celui de Berre, du nom de l'étang où se jette encore le cours d'eau actuel par lequel le bassin a toujours communiqué avec les

mers contemporaines. On doit considérer comme à peu près évident, que les formations anciennes se continuent sous les deux détroits indiqués, comme des seuils recouverts, en sorte que l'on a en réalité l'image d'un bassin grossièrement elliptique égueulé vers l'ouest à l'extrémité de son grand axe, et rempli de dépôts alternativement perméables et imperméables. D'après cela il semblerait que le régime acquifère qu'on rencontrera sera celui des *niveaux* du Nord. Pénétrant par les affleurements des couches perméables, les eaux devraient y former des nappes plus ou moins horizontales, ayant entre elles une certaine indépendance, et les difficultés de fonçage ou d'assèchement des travaux sembleraient devoir n'être que ce qu'elles sont fréquemment en pareil cas, c'est-à-dire passage du niveau au besoin par un cuvelage, puis développement avec sécurité relative dans des étages plus ou moins imperméables. Les saisons pluvieuses en pareil cas correspondent à un travail plus considérable des moyens d'exhaustion, mais ne compromettent jamais tout ou partie des travaux. Si considérables que soient en effet les quantités d'eaux tombées, elles ont pour arriver au fond des travaux un assez long trajet souterrain à parcourir et les masses souterraines dans lesquelles elles se déversent en cheminant horizontalement, sont comme un réservoir commun dans lequel viennent s'atténuer les fortes crues provenant des actions extérieures.

Il est bien loin d'en être ainsi dans la vallée de l'Arc, ou pour parler plus rigoureusement dans la partie de cette vallée où les travaux des mines ont conduit les exploitants à *lutter* contre les eaux.

Deux raisons peuvent en être indiquées :

La première, c'est que les couches de combustibles sont au sein d'un paquet essentiellement calcaire, qui bien que constitué par des roches imperméables *en petit* est généralement perméable *en grand*, à cause de nombreux fen-

dillements dont les bancs sont souvent sillonnés. Il résulte de là que ce qui tombe d'eaux zénithales sur les affleurements chemine à l'intérieur rapidement.

La seconde et la principale est la présence des cassures, qui sous les noms locaux de *partens* ou de *moulières*, ou sous le nom classique de failles, augmente dans une proportion considérable la faculté de conductibilité des eaux. Un parten est une simple cassure plus ou moins serrée sans dénivellation ou avec une dénivellation insignifiante. Cela est fréquemment une moulière réduite à sa plus simple expression.

Les failles remplissent tantôt l'office de barrages, tantôt celui de conduites d'eau. Cela dépend entre autres choses de l'épaisseur et de la compacité de leur remplissage. Sur la carte Pl. I, qui représente l'assemblage des concessions exploitées dans le bassin, j'ai figuré sept accidents. Les trois marqués F, F′, F″ ont produit des dénivellations énormes et dans des directions divergentes.

Ce sont des failles ouvertes plus ou moins, et redoutables par conséquent au point de vue des eaux ; les autres ont produit des dénivellations de plusieurs mètres, pouvant aller jusqu'à 25 mètres, et sont à peu près parallèles entre elles, sauf la dernière qui les coupe d'équerre. Les deux premières *f* et *f′* ont un rôle capital au point de vue des eaux. Ce sont des failles barrages à l'abri desquelles les concessions de Saint-Savournin (nord et sud) jouissent d'une sécurité relative, quant aux venues d'eau, lesquelles ont leur origine au nord et à l'est.

On doit remarquer que toutes les failles sont situées dans la partie sud du bassin, c'est-à-dire à l'intérieur ou au voisinage d'une sorte de golfe profond, déterminé par le surgissement du promontoire secondaire de Regagnas, sorte d'éperon détaché de la chaîne du mont Olympe. On comprend très bien que dans la partie du bassin à lignite située à l'intérieur ou au voisinage du golfe en question,

des dislocations ont pu et dû prendre naissance, par suite de la forme même de ce golfe, aux parois tourmentées, tandis que dans la vaste étendue qu'occupent au nord de Regagnas la Grande Concession et les concessions de Trets et de l'Arc, les couches soulevées sur le dos en arc de cercle du promontoire par un mouvement simple, ont conservé une direction à peu près rectiligne de l'est à l'ouest, en se moulant largement sur l'éperon secondaire. Le sud du bassin peut être dit la région des failles.

En revanche le nord, à partir de la faille Jean-Louis (*f*) et jusqu'à Trets, constitue la région des moulières.

Une moulière est une cassure sans dénivellation du plan des couches, dont le plan est vertical et qui s'est produite dans les roches du terrain à lignite. Elles se reconnaissent à la surface du sol à des indices auxquels les mineurs ne se trompent pas. Sur leur passage toute régularité dans la stratification disparaît ; les bancs sont cassés en blocs souvent très gros, et des traces d'effondrement quelquefois bien marqués les accompagnent. Lorsqu'on chemine par une galerie de niveau dans une couche de charbon et qu'on approche d'une moulière, on s'en aperçoit en voyant le charbon devenir terne et friable au lieu de dur et compact ; les roches encaissantes elles-mêmes se modifient d'aspect ; elles sont humides, poreuses, leur cassure n'est pas vive, l'argile abonde et la couche tend à s'amincir, tout en se déprimant ; il arrive que l'on rencontre des vides, parfois de véritables grottes plus ou moins remplies de matières de transport ; ces grottes sont tantôt vides, tantôt pleines ; enfin soit sur leurs parois soit dans les fentes des roches avoisinantes, du calcaire spathique déposé par les eaux saturées de carbonate de chaux, indique la production du phénomène inverse de la dissolution. Ces *partens de sel* sont connus de tous les mineurs de Fuveau. En pleine moulière le charbon est remplacé par une boue noirâtre impropre à tout usage, laquelle indique

encore l'emplacement de la couche; parfois cependant cette couche disparaît, non qu'elle ait été relevée ou rabaissée par une dénivellation, mais parce qu'elle s'est affaissée; on passe dessus dans les matières argileuses de transport, et l'on continue la galerie de niveau pour retrouver la couche saine et en place, après cette altération momentanée. L'expérience a démontré depuis longtemps que les moulières diminuent d'amplitude en profondeur et un certain nombre d'entre elles, par suite de l'approfondissement des travaux, n'existent déjà plus dans les niveaux actuellement exploités.

L'explication du phénomène des moulières a été donnée par M. de Villeneuve, et les observations subséquentes n'ont fait que la confirmer. Les eaux de surface chargées d'oxygène et d'acide carbonique, en pénétrant dans le sol par les cassures verticales qui ont, au début, formé l'axe de la moulière, ont oxydé les pyrites répandues dans toutes les couches de ce terrain, en particules souvent presque indiscernables. Sous l'action de l'acide carbonique dissout et de l'acide sulfurique naissant, les calcaires ont été partiellement dissouts, les carbures d'hydrogène préexistant dans le charbon, attaqués et détruits, et cette action a fini par produire des vides qui ont amené les affaissements des couches se propageant jusqu'à la surface; de là l'aspect chaotique et déprimé des affleurements de moulières. Les cavernes ont eu pour origine des vides préexistants, mais beaucoup moins importants. La dissolution de leurs parois les a agrandies, puis l'entraînement des parties argileuses résultant de la dissolution des calcaires supérieurs, les a fréquemment remplies à nouveaux des éléments détritiques qu'on y rencontre toujours. Ces modifications des couches de combustibles et des roches avoisinantes ne sont pas particulières au bassin à lignite de Fuveau; sous des formes un peu différentes et avec des intensités plus faibles, tenant à la quasi-verticalité des

couches qu'on y exploite, le bassin de Manosque offre les les mêmes caractères. Il paraît que les combustibles exploités sur le plateau du Larzac font de même, d'après ce qu'a bien voulu me dire M. l'inspecteur général de Nerville ; enfin le mémoire de M. Lallemand, sur les lignites de la Bohême (*Annales des mines*, 3e livraison de 1881), signale l'existence dans la couche de lignite exploitée, de vastes cavités remplies d'argile et de poussière de charbon et dont la formation et le remplissage me paraissent avoir une origine tout à fait analogue à celles des Bouches-du-Rhône. Sans qu'on puisse dire que les lignites seuls présentent le phénomène d'altération des moulières, il paraît au moins que c'est cette nature de combustible qui est la plus propice à son développement. Il ne serait peut-être pas téméraire de penser que cela tient à la prépondérance de l'oxygène dans leurs parties volatiles.

On s'explique bien que dans les parties profondes, les moulières disparaissent par la double raison que les eaux y doivent être dépouillées des éléments oxygénés, et que les variations de niveau de la nappe générale aquifère, ne descendent pas au-dessous d'une certaine profondeur sous le sol, passé laquelle les roches sont constamment baignées et jamais alternativement mouillées et asséchées.

Toute faille doit pouvoir, lorsqu'elle est considérée au-dessus du niveau moyen des eaux et qu'elle est assez peu serrée, donner lieu aux phénomènes d'altération des moulières, et c'est bien en effet ce que l'on constate. On voit même parfois des parties qui ne sont en relation ni avec une dislocation horizontale, ni avec un rejet vertical, et qui constituent ce que les mineurs appellent des *ronds de mur* ; ils sont causés par une introduction d'eaux superficielles pénétrant d'une manière ou d'une autre dans la mine. Toutefois il est un fait qui doit avoir sa raison d'être et que les travaux ont établi : la véritable moulière

coïncide toujours avec les dislocations dans le sens horizontal, sans dénivellation, elle y est beaucoup plus prononcée qu'aux abords des failles, mêmes importantes considérées aux mêmes niveaux, et très souvent même les travaux souterrains dépouillent le long des failles des parties de charbon tout à fait saines. On s'est demandé si la raison de ce fait n'était pas l'antériorité des moulières par rapport aux failles ayant permis à l'action des eaux de s'exercer pendant un temps beaucoup plus long sur les premières que sur les secondes. Cette antériorité, au moins pour les principales moulières du bassin, a été indiquée par M. de Villeneuve, non qu'il y ait rattaché le fait plus haut mentionné, lequel ne paraît pas avoir fixé son attention, mais comme conséquence de considérations de direction auxquelles il attachait comme on sait une importance capitale. On peut voir en effet aux pages 404 et 405 de la *Description géologique et minéralogique du Var*, que les failles et moulières du bassin sont rapportées par lui à quatre époques différentes, dont la plus ancienne dessinerait dans le bassin la direction des moulières de Fuveau. En fait, l'examen attentif de la surface, non plus que celui des travaux intérieurs, n'a jamais permis d'appliquer aux failles ou aux moulières les considérations de rejets de tel ou tel accident par tel ou tel autre, duquel on peut déduire en général l'antériorité du premier par rapport au second. Observons même que les expériences de M. l'inspecteur général Daubrée ont établi que la loi de l'antériorité résultant du rejet n'a pas une absolue généralité. En fait tout se passe dans le bassin comme si l'on était en présence d'un vaste craquelage, dont tous les éléments seraient contemporains.

Il faut donc chercher une autre cause à la concordance des moulières, avec les joints sans dénivellation, et elle peut être celle-ci :

Une cassure verticale sans dénivellation suppose néces-

sairement pour la produire un effort horizontal, soit de retrait, soit mécanique.

Des failles peuvent être serrées, des joints sans dénivellation ne sauraient l'être; ils doivent être ouverts et laisser aux eaux un passage généralement facile; il le sera d'autant plus que les mouvements horizontaux qui auront donné naissance à la cassure auront été plus violents, toutes choses égales d'ailleurs, et que les terrains sur lesquels ils auront agi auront été plus cassants et moins étirables; le plus ou moins d'ouverture horizontale joue le rôle de l'amplitude verticale de la faille. Les calcaires qui enferment les couches de charbon de Fuveau remplissent au plus haut degré la condition de la nature cassante des couches; quant aux poussées latérales, elles ont été extrêmement violentes dans la vallée de l'Arc. Il y a bien longtemps que MM. Matheron et de Villeneuve ont signalé le retournement des couches du Tholonet, le long de la montagne de Sainte-Victoire, mais ce phénomène est loin d'être localisé sur la rive nord de l'ancien lac de Fuveau. Le bord méridional, depuis Mimet jusqu'au delà des Pennes, montre exactement les mêmes retournements des couches lacustres inférieures ou saumâtres du bassin, paraissant plonger sous le turonien qui lui-même paraît s'enfoncer sous le cénomanien, celui-ci à son tour, sous l'aptien, et le tout semblant vouloir passer au-dessous des masses de la chaîne de l'Étoile. Ce phénomène, sur lequel j'aurai à revenir plus loin, n'a pu évidemment se produire sans des mouvements horizontaux considérables ; en dehors des joints devenus moulières, je suis disposé à y voir la raison de la fissuration en masse de tous les calcaires de la vallée de l'Arc.

Les joints ne se révèlent parfois que par des suintements d'eau et font penser à ces fentes révélées par de simples jeux de lumière dans les glaces qui ont servi à M. l'inspecteur général Daubrée dans ses expériences. (*Études synthétiques*, page 313).

Pour en finir avec l'origine des moulières, je dirai encore un mot de leur direction. On ne peut pas les rapporter à une, ni même à deux ou trois orientations autour desquelles elles oscilleraient peu; cependant leur direction est bien loin d'être quelconque, et voici ce qu'on peut dire : Depuis Trets jusqu'à la faille Jean-Louis, c'est-à-dire dans toute la région du principal lambeau lignitifère, dite région des Moulières, ces accidents sont à peu près perpendiculaires à la direction des couches, c'est-à-dire à la direction générale du promontoire soulevant (moulières de Trets, des Michels, de l'Albinote, etc.); dans le lambeau de Gardanne ou de la Félicie, on observe la même perpendicularité approchée par rapport aux affleurements ou à la direction soulevante; enfin en s'approchant de la partie du grand lambeau qui prend la direction nord-sud, on rencontre des moulières qui sont au contraire à peu près parallèles à la direction des couches et à la séparation des terrains soulevant et soulevé (moulières de Prosper et Bonaventure). Le parallélisme s'explique assez facilement : on comprend que le soulèvement lent ou brusque doive produire des étirements dans cette direction. Quant à la direction quasi perpendiculaire, je ne m'en rends pas aussi bien compte, et cependant c'est incontestablement la mieux marquée.

Quoi qu'il en soit, les failles pour une faible part, la fissuration générale des calcaires et spécialement le phénomène des moulières ont, comme cela a été dit plus haut, donné au régime hydrologique de la vallée son caractère spécial et commandent, comme on va le voir, le système d'épuisement rationnel à adopter. Les eaux pluviales, au lieu de se rendre dans les travaux par le cheminement horizontal en partant des affleurements perméables, y arrivent verticalement et par suite avec soudaineté. Il suit de là que, quelle que soit la puissance mécanique employée pour l'exhaustion, les travaux inférieurs aux galeries d'écoulement sont fatalement noyés de temps en temps, lors

des chutes torrentielles qui relèvent subitement le plan d'eau ou, pour parler plus exactement, la surface souterraine. Cette surface n'est autre chose que celle du cours d'eau souterrain occupant au sein des calcaires fuvéliens les parties profondes de la vallée de l'Arc, ayant pour niveau inférieur constant le niveau de la mer, pour toit les argiles de la Bégude qui se relèvent au-dessous de Velaux et de Rognac, pour affleurements multiples les sources naturelles de la vallée, et pour hauteur, en divers points, le niveau même de l'eau dans les puits de mines. On se ferait évidemment de cette nappe une idée très *éloignée* de la vérité en se la représentant comme une étendue d'eau à surface continue ; il faut la concevoir comme un niveau aquifère dont les innombrables canaux s'anastomosent entre eux et baignent de tous côtés des polyèdres de toutes formes et de toutes dimensions, d'où résulte que la surface aqueuse est une très faible fraction de la *surface* hydrostatique du bassin qui la renferme. La perméabilité des calcaires est, il faut le remarquer ici, très différente de celle des sables; la première est une perméabilité fragmentaire, la seconde peut être dite moléculaire; cette nature des choses implique forcément des variations considérables dans le niveau général de la nappe pour des quantités relativement faibles de pluie tombée et d'eau infiltrée. On peut avoir une idée de ces variations de hauteur par la Pl. III qui donne, depuis 1868, la hauteur de l'eau dans le puisard et, trop souvent, dans le puits principal d'épuisement. On reconnaît que, malgré des moyens d'épuisement qu'on peut dire exceptionnels eu égard à la production, malgré des galeries d'écoulement aux cotes 252 (Castellane) et 230 (Rocher-Bleu), la recette du puits Léonie, à la cote 122 mètres, soit à un peu plus de 100 mètres seulement au-dessous de la grande galerie d'écoulement a été prise par les eaux quinze fois dans l'espace de quinze années, que la durée totale d'interruption

n'a pas été moindre de quatre années, en y comprenant le temps employé pour remettre tout en état. Conçoit-on une situation plus intolérable pour une grande exploitation? En rapportant la quantité d'eau enlevée à la quantité de charbon extraite, on voit que de 1868 à 1882 inclus on a pompé de 6 à 30 mètres cubes et en moyenne 15^{m3},5 pour 1 tonne de charbon sortie, et cela, remarquons-le bien, sans tenir compte des masses bien plus considérables qui sortent des galeries. On s'explique ainsi que les frais d'épuisement aient pu dépasser en certaines années 1^{f},30 par tonne, 16 p. 100 des dépenses totales, et encore ces chiffres de 1^{f},30 et de 16 p. 100 étant calculés d'après la quantité de charbon totale exploitée, et une partie plus ou moins grande de cette quantité provenant d'une région soumise à un régime différent de celui des deux grands puits servant à l'épuisement, il y aurait lieu de les majorer sensiblement.

A titre de simple aperçu et pour avoir une idée de la différence de niveau que peut imprimer à la nappe souterraine une pluie importante, citons les chiffres suivants : les pluies de 100 millimètres en 24 heures ne sont pas très rares dans le Midi. Concevons une de ces pluies tombant à une époque où déjà les réservoirs souterrains sont imbibés et admettons aussi que la pluie quoique fort abondante, n'a pas eu ce caractère de trombe qui donne de telles quantités que l'infiltration n'a pour ainsi dire pas le temps de se faire (*). Il résulte des études de M. de Villeneuve (*Annales des mines*, 1854) que la filtration sous le climat méditerranéen correspond annuellement à une nappe moyenne de 327 millimètres de hauteur; c'est à très peu près

(*) On peut citer comme exemple tout récent de ces phénomènes météorologiques exceptionnels du Midi la pluie qui, dans la nuit du 26 au 27 octobre 1882, a versé, en six heures, 139 millimètres à Cannes.

50 p. 100 de la moyenne annuelle tombée. Admettons que dans une pluie de 100 millimètres, il n'en passe même que 25 p. 100, que 20 p. 100. De quelle hauteur ces 20 ou 25 millimètres vont-ils élever le niveau? Pour le savoir, il faudrait évidemment connaître le rapport de la surface liquide réelle, déduction faite des polyèdres non imbibés, à la surface du terrain absorbant. Or, sans attacher à une fraction plutôt qu'à une autre l'idée d'exactitude, on peut bien estimer cette fraction à $\frac{1}{100}$, $\frac{1}{200}$, $\frac{1}{500}$ peut-être. Cela correspondrait à des élévations de 2 à 2m,50 ; de 4 à 5 mètres ; de 10 à 12m,50. Et ce qu'il importe aussi d'observer, c'est que la *vitesse* d'arrivée de ces eaux en un point où un épuisement sera installé sera bien plus grande, toutes choses égales d'ailleurs, que si l'on a affaire à des couches de sable ou de grès, à cause du frottement infiniment plus grand dans le second cas que dans le premier. On arrive ainsi à comprendre ce que fait voir la Pl. III, je veux dire l'amplitude du soulèvement soudain du niveau *moyen* de la nappe souterraine et l'impuissance des engins d'épuisement les plus considérables.

Je viens de dire : le niveau *moyen;* il est clair, en effet, que l'élévation de cette nappe ne se fait pas comme celle d'une surface qui se déplacerait parallèlement à elle-même, mais bien comme une surface passant toujours par le rivage de la mer aux embouchures de la vallée et qui, autour de cette espèce de charnière, monterait ou descendrait suivant les saisons ; il résulte de là que les variations de hauteur sont d'autant plus grandes que l'on considère une section de la nappe plus éloignée de l'embouchure. Dès lors, plus on considérera des points à l'est et plus on a chance de voir une pluie déterminée produire des ascensions subites d'eau de plus grande amplitude, autrement dit, plus les moulières seront à une altitude élevée et plus elles seront redoutables. Ce fait si bien connu dans le bassin reçoit, comme on le voit, une explication fort simple.

Il en est un autre également remarquable que je crois pouvoir rattacher au même ordre d'idées. J'ai dit plus haut que le bassin pouvait se partager en deux régions distinctes : celle des failles, au sud, et celle des moulières, au nord. Qu'il n'y ait pas de faille dans toute la partie du bassin qui s'appuie avec une direction est-ouest sur le revers de l'éperon de Regagnas, cela peut s'expliquer par le mouvement très lent de soulèvement de ce promontoire, lenteur qu'atteste d'autre part, de la manière la plus nette, la transformation des eaux devenues progressivement douces de salées qu'elles ont été au début ; mais pourquoi pas de moulières dans la région de Peypin et de Saint-Savournin ? Ce ne sont cependant pas les joints qui manquent. Il n'y a pas de région plus fissurée, à tel point que cette fissuration et les très nombreux petits ou grands travers-bancs qu'elle entraînait dans la galerie de roulage étaient la seule cause pour laquelle, pendant de longues années, les exploitants, par une économie bien mal entendue, se sont refusés à introduire les chevaux dans la mine pour le roulage intérieur, bien qu'il comportât des galeries de 1.200 à 1.500 mètres. Les calcaires sont d'ailleurs les mêmes que sur le revers de Fuveau et de Trets.

La raison de cette absence de moulières me paraît être que la région exclusivement failleuse n'est pas dans le bassin de l'Arc, mais bien dans celui de l'Huveaune ou plus rigoureusement dans celui du Merlançon, son affluent. Ce petit cours d'eau, dont le bassin de réception est insignifiant, ne saurait donner lieu à une nappe souterraine importante et l'on ne peut trouver là les grandes et brusques dénivellations dépendant, dans la vallée de l'Arc, des phénomènes que j'ai examinés plus haut. Cette explication paraîtra, je l'espère, très frappante en superposant un plan des travaux au plan de surface. La faille Jean-Louis, qui dessine le col séparant les vallées de l'Huveaune et de l'Arc termine la région des failles et immédiatement

après débute la région des moulières par celle de la Dubreuil (*).

CHAPITRE II.

HISTORIQUE DE L'ÉPUISEMENT.

De l'ensemble des considérations précédentes, il résulte que le seul système pouvant assurer l'assèchement des travaux souterrains du bassin de Fuveau, c'est celui des galeries d'écoulement. Cette conviction qui aujourd'hui ne compterait pas, je pense, un seul récalcitrant, ne s'est pas établie sans contestation; maintenant qu'on peut la soute-

(*) Pendant l'impression du présent travail a paru, dans la 2e livraison de 1883 de ce recueil, une note de M. l'Ingénieur Lodin, sur certains combustibles de l'Istrie et de la Dalmatie, dont la situation géologique et les caractères offrent avec ceux du bassin de Fuveau des points de contact fort intéressants. Ainsi l'on peut y signaler d'abord l'analogie de position dans la série géologique générale. Il est manifeste que l'étage liburnien de M. G. Stache représente tout ou partie de la série beaucoup plus complète que l'on trouve en Provence. La coupe transversale de la vallée de Carpano, donnée à la page 217, où nous voyons se succéder de haut en bas la série: terrain nummulitique, calcaires à Chara, couches de Cosina avec veines de lignite, puis enfin, niveau des lignites exploités, le tout reposant sur les bancs à hippurites, offre avec la coupe détaillée donnée à la page 16 de la présente étude des rapports de similitude très marqués, aussi marqués qu'on a le droit de l'espérer en comparant deux séries très éloignées comme position géographique, et l'une complète, l'autre atrophiée.

Nous y retrouvons également (pages 219 et suivantes) et d'une manière frappante les moulières de Fuveau, dans les entonnoirs du Karst, judicieusement attribués aux mêmes causes. Tout y est: la fracture préexistante et finissant en pointe, la corrosion et l'altération chimique postérieure, les affleurements à l'aspect chaotique et déprimé, les dépôts subséquents de calcaire spathique dans les fentes, et enfin ce limon rouge ou jaune (*terra rossa*) qui

nir en l'appuyant non plus seulement sur des vues, mais sur des observations, l'étude des faits et une expérience trop souvent répétée, cela paraît tout naturel; il n'en a pas toujours été ainsi, et il ne faut pas remonter à beaucoup d'années pour trouver un exemple mémorable de la dernière et considérable erreur commise à ce sujet.

Il ne sera pas sans quelque intérêt d'indiquer quelles ont été les formules générales de l'exploitation du bassin au point de vue des dangers qu'y ont toujours offerts les eaux. On peut distinguer à cet égard trois périodes assez distinctes.

La première, qui commence au début même de l'exploitation, est celle de l'épuisement sans engin ni galerie : on fonce des puits inclinés dans le plan des couches ou à travers-bancs et l'on choisit pour cela la partie centrale d'une *branche*, c'est-à-dire d'une partie saine comprise entre deux accidents, moulière ou faille. On s'approche avec précaution et pendant la saison sèche des limites de la branche; généralement et quand le travail a été bien conçu, on perce la moulière au-dessus de la surface de la nappe; les eaux de pluie ou de source s'y rendent : c'est un *puits* d'écoulement. On travaille alors en *pendis* (chantiers au-dessous de la voie de roulage); puis quand vient la saison pluvieuse (avril et mai et surtout octobre et novembre), on bataille avec les eaux, on abandonne les pendis, puis parfois la galerie de roulage elle-même; les travaux sont noyés : on y rentrera à la saison sèche prochaine.

Les choses se passent ainsi jusque vers 1829; vers cette époque, et sous l'impulsion du service des mines dont les

---

empâte les blocs et qui est évidemment notre argile des moulières.

Nous ne voyons pas que la considération des directions affectées par ces accidents ait préoccupé M. Lodin; il est à croire que l'on a principalement affaire aux *ronds de mou* des mineurs de Fuveau se présentant sur des dimensions parfois colossales.

procès-verbaux de visite attestent les conseils, la galerie d'écoulement dite de la Devillière ou de Castellane, est entreprise à la cote 252,70 pour assécher les travaux de la Grande Concession; en même temps ou à très peu près (1830-31), les concessionnaires voisins de Peypin et Saint-Savournin (Nord) ouvrent à la cote 258,60 la galerie dite de Valdonne.

Il n'est que juste toutefois de signaler que vers 1824 dans la partie ouest du bassin, sur le grand lambeau de Gardanne, la vraie solution avait été appliquée avec une décision remarquable pour l'époque et la localité : une galerie d'écoulement entreprise à la cote 241 avait été pratiquée pour pouvoir exploiter la partie du terrain utile qui s'étend sur les communes de Gardanne et de Mimet. C'est sous la protection de ce travers-bancs ou galerie Mallet, dont la longueur dépassait 400 mètres, que tous les travaux entrepris sur la concession de Gardanne ont pu être exécutés jusqu'au percement de la galerie Saint-Pierre, y compris tous ceux du puits Félicie qui pendant les dernières années n'ont pas laissé de fournir un quantum important. Foncé verticalement en 1854, jusqu'à la cote 261, ce puits Félicie a prouvé une fois de plus, lorsqu'on a voulu l'approfondir jusqu'à la grande mine, en 1869-70 (cote 196), que même dans les régions en aval du centre du bassin on devait compter sur les difficultés de tout épuisement autre que l'exhaure naturel.

On marche ainsi sous la protection des ouvrages précités dans les régions qu'ils desservent (concession de Peypin et Saint-Savournin (Nord) et Grande Concession), pendant une dizaine d'années à peine; mais dans la partie nord de la concession de Gréasque et de Belcodène la configuration du sol ne se prêtant pas aussi facilement à l'ouverture d'une galerie à une cote utile, lorsque vers 1838, MM. Michel, Armand et Ce, désirent donner une plus grande impulsion aux travaux, on ne voit d'autre moyen d'épuisement qu'une

véritables régulateurs pour l'épuisement du capital d'eau emmagasiné derrière eux.

Cette année 1856 vit s'implanter dans le bassin des Bouches-du-Rhône une société puissante qui, achetant une partie des concessions, puis s'en annexant d'autres par la suite, ne tarda pas à constituer un centre très important. Ce fut un grand bien pour la mise en valeur des richesses minérales de la vallée de l'Arc. La Société Lhuillier et Cie, plus tard Société anonyme des charbonnages des Bouches-du-Rhône, sous le coup de nécessités très graves qui s'imposèrent à elle dès son début, fut obligée de constituer fortement son personnel technique, et d'appliquer les procédés perfectionnés de l'art des mines aux diverses branches de son exploitation. Au prix d'écoles inévitables dans ses débuts, elle a été, grâce à sa puissance financière, à l'énergie et à la capacité de son personnel, l'artisan principal et incontestable des progrès accomplis dans le bassin des Bouches-du-Rhône depuis vingt cinq ans.

Dès les premiers mois de l'exploitation de ses concessions, la Société Lhuillier avait été frappée de la gravité exceptionnelle de la question d'épuisement. La Société Michel-Armand était fixée à cet égard. Il se produisit alors tout naturellement un projet de fusion entre les nouveaux venus et les anciens exploitants du bassin. L'idée d'une grande galerie de rabais était déjà dans les esprits; l'administration y poussait, aussi accueillit-elle avec empressement un projet de fusion qui malheureusement devint lettre-morte par suite de défaut d'entente finale. Quoiqu'il en soit, le problème de la grande galerie d'écoulement était posé; si la solution la plus radicale qu'on envisage aujourd'hui sans appréhension et qui consiste à conduire les eaux à la mer n'avait pas été dès l'abord considérée comme possible, on parlait déjà de traverser la chaîne de l'Étoile en partant soit de Roquevaire à la cote 105, soit de la Bourdonnière à la cote 161. On avait aussi étudié

une galerie partant du point le plus bas des territoires concédés : le moulin du Pont-de-Bouc à la cote 167. L'une quelconque de ces trois galeries aurait eu une longueur de 6.000 à 7.000 mètres et eût coûté aux environs de 2 millions.

L'abandon du projet de fusion entre les deux sociétés fit reléguer au second plan les moyens d'épuisement naturel : il fallait que la démonstration de 1840 se renouvelât sur une plus vaste échelle.

De cette époque date le placement de la grande machine Léonie par la Société Lhuillier et Ce, et plus généralement l'inauguration par elle d'une recherche active, incessante de tous moyens mécaniques ou autres propres en dehors de la galerie, à lutter efficacement contre les eaux. L'exposé de la discussion de tous ces moyens constituera à lui seul un chapitre extrêmement intéressant de l'histoire de l'exploitation lignitifère. Le tableau de l'extraction de cette société, qui commence en 1856 par 14.000 tonnes, et qui en 1882 atteint 252.000, montre par cet accroissement que la lutte avec les eaux a été en somme couronnée de succès, puisqu'elle a permis ce développement important dans la production; mais peut-on dire que ce succès a été complet? Non certainement : le diagramme de la Pl. III le montre d'une manière saisissante. Il y a autre chose : la question de sécurité n'est pas tout; il y a aussi la question économique : on conçoit que si déplorable que puisse être à un moment donné l'obligation de fuir devant les eaux, ce pourrait être, en présence d'une dépense trop considérable pour supprimer ce danger, la seule et unique formule d'exploitation rationnelle imposée par la situation. Il faut donc, et c'est ce qu'il sera facile d'établir plus loin, montrer que non seulement techniquement, mais aussi économiquement parlant, on est invinciblement ramené vers la seule solution logique consistant à profiter du voisinage relatif de la mer pour y dégorger les eaux. C'est cette conviction qui, d'abord acceptée par les exploitants du bassin en 1857,

reléguée au second plan par suite du défaut d'entente, reprise, sous le coup de la nécessité, avec plus de largeur et une appréciation plus complète des conditions auxquelles il fallait satisfaire, préoccupe depuis dix ans, pour la faire aboutir, le directeur si compétent et si expérimenté de la Société des charbonnages des Bouches-du-Rhône, à qui reviendra tout l'honneur de son exécution. Reste à choisir rationnellement le point de départ et le point d'arrivée de ce grand travail.

CHAPITRE III.

ÉTUDE DU TRACÉ DE LA GALERIE.

§ 1.

Allure des couches exploitables. — Détails divers.

Il a déjà été dit que le terrain de lignite s'oriente autour d'un promontoire de calcaire secondaire séparant les vallées de l'Arc et de l'Huveaune, entre les villes de Trets et d'Auriol. Le point le plus occidental de cette chaîne est signalé par l'auberge de *la Pomme*, bâtie à la croisée des routes nationales n°s 96 et 8 *bis*. Les lignes de niveau des couches, d'abord est-ouest, passent progressivement au nord-sud, en allant de Trets à Peynier, Fuveau et Gréasque; elles dépassent même légèrement l'orientation méridienne pour revenir vers la direction ouest-est, mais avec le pendage du côté sud. On retrouve les couches exploitables avec le pendage franchement sud au nord du village de Mimet dans la direction de Mimet vers Simiane, sans atteindre toutefois le méridien de ce dernier village, sauf en des réapparitions dont il sera question plus

loin. Enfin sur le versant nord de l'ancienne vallée de l'Arc, tout près de l'étang de Berre, dans les territoires de La Fare et de Coudoux, l'étage fuvélien avec son facies et ses fossiles propres reparaît sous les formations supérieures qui ont empli la vallée. Des concessions autrefois instituées sur cette partie du bassin et que des tentatives d'exploitation remontant à quelques années ont donné occasion d'étudier, ont permis d'y faire des constatations intéressantes au point de vue de la continuité, non pas du terrain qui renferme les veines de lignite — cette continuité n'a jamais été mise en doute — mais des couches de charbon elles-mêmes.

Dans le tableau du § 1er, chapitre I, j'ai attribué au groupe fuvélien une épaisseur de 200 mètres. Il est à peine besoin de dire que c'est là une épaisseur moyenne. Elle peut osciller entre 220 mètres et 130 mètres si l'on élague des épaisseurs les plus faibles celles qui sont tout à fait sur les bords du bassin et qui seraient encore au-dessous de 130 mètres. L'épaisseur maxima du terrain se présente comme on pouvait le présumer vers le centre du bassin. Je donne comme exemple une coupe détaillée qui me paraît avoir été prise aux environs de l'ancien puits du Rocher-Bleu et qui réalise à peu près le maximum d'épaisseur constaté. On voit que sans parler de quelques filets tout à fait insignifiants, on peut compter sept couches qui sont dans l'ordre descendant celles que donne le tableau suivant, lequel fournit aussi divers renseignements intéressants à connaître. On doit noter que les chiffres portés à ce tableau ont négligé à dessein les points trop éloignés des centres d'exploitation connus ou ceux placés tout à fait sur la lisière du bassin où le caractère tout à fait prépondérant de dépôts littoraux, sans jeter le moindre doute sur l'assimilation des couches avec celles qui sont connues dans les régions exploitées, altère plus ou moins profondément leur épaisseur et leurs distances respectives.

NOMS DES COUCHES.	DISTANCE VERTICALE entre les couches.		ÉPAISSEUR DE LA PARTIE DES COUCHES			
			Utile.		Stérile.	
	Maxim.	Minim.	Maxim.	Minim.	Maxim.	Minim
Mine de Fuveau ou de Gréasque.......	....	.....	0,35	0,20	0,45	0,30
	95	64				
Id. de Deux-Pans...	.....	.....	0,32	0,20	0,44	0,35
	13	9				
Id. de l'Eau.	.....	.....	0,30	0,25	0,40	0,30
	38	18				
Id. du Gros-Rocher. .	.....	...	0,80	0,25	0,85	0,30
	10	7				
Id. de Quatre-Pans. .	.....	.....	0.85	0,32	1,00	0,40
	48	28				
Mauvaise-Mine.....,	.....	.....	0,50	0,25	0,50	0,35
	12	7				
Grande-Mine.......	....	.....	2,50	0,60	0,48	0,10

Ce tableau montre que la couche inférieure ou Grande-Mine est toujours exploitable; que les trois qui la surmontent le sont parfois et cela arrive dans l'ordre de fréquence descendant suivant : Quatre-Pans, Gros-Rocher et Mauvaise-Mine. D'une manière générale on peut dire que les épaisseurs des couches de charbon varient dans e même ordre que celle du dépôt entier, ainsi, par exemple, alors qu'à l'orient du bassin, côté de Trets et de Peynier, la Grande-Mine est assez mince et seule exploitable, à partir du méridien de Belcodène les trois autres couches formant le groupe des Petites-Mines le sont partout, au moins l'une ou l'autre d'entre elles en même temps que s'accroît à l'ouest la puissance de la masse stratifiée qui les recèle; cependant la loi de variation d'épaisseur des veines de lignite est moins simple que cela ne paraît au premier abord. Il y a d'abord les variations qu'on peut dire locales, celles qui se produiront sur l'étendue d'une grande galerie d'allongement. Les diagrammes (Pl. IV, *fig.* 2 et 3), dus à M. Bouche, ingénieur de la Société de Charbonnages des Bouches-du-Rhône, ont pour effet de faire bien saisir comment elles ont lieu sur les deux plus grandes galeries de rou-

lage du bassin, et bien qu'elles soient l'une au-dessus de l'autre et distantes en verticale de moins de 50 mètres, on voit que les courbes, bien qu'affectant dans l'ensemble des allures non contradictoires, ne sont point semblables. De ces variations locales il n'est pas possible ni utile même de chercher une explication détaillée, on peut y voir seulement comme un reflet de la théorie de la formation des combustibles minéraux exposée par M. Grand'Eury comme résumé de ses beaux travaux. Il est certain que ces variations relativement brusques vont bien mieux avec l'idée de ces courants intermittents, de ces ruissellements violents, que la végétation et l'enfouissement progressif sur place. Il y a ensuite les variations régionales, et celles-ci, plus intéressantes que les précédentes peuvent et doivent même se rattacher à l'état de la surface du sol émergé lors du dépôt des couches. On remarque, par exemple dans le bassin de Fuveau, que toute la lisière sud à partir de la concession de Peypin et Saint-Savournin (Nord), région des puits Notre Dame et Saint-Joseph, jusqu'à l'extrémité occidentale du lambeau dit de Gardanne, entre Simiane et Mimet a toujours donné des épaisseurs de charbon beaucoup plus favorables que le centre du bassin; là toutes les couches, y compris la Mauvaise-Mine, sont exploitablessauf en de rares passages. On peut y voir, dans la théorie du savant que je viens de citer, la preuve d'une plus grande abondance dans la végétation qui préparait, tout le long de la chaîne de l'Étoile, les matériaux pour la sédimentation carbonifère dont nous exploitons aujourd'hui les produits.

Je donne diverses coupes détaillées des trois couches les plus exploitées du bassin afin qu'on puisse se rendre compte de l'amplitude qu'affectent ces variations régionales (Pl. IV, *fig.* 1, 4 à 10 et Pl. V, *fig.* 1 à 12). Toutes ont été prises dans des chantiers en exploitation, et il faut noter qu'il y a toujours au-dessous des couches ainsi représentées divers filets généralement inexploitables, entremêlés qu'ils

sont de nerfs impossibles à enlever à cause de leur multiplicité et qu'on nomme les croûtes ou restoubles.

Au commencement de ce paragraphe j'ai dit que, au sein du même groupe fuvélien, sur le versant de La Fare, les couches de lignite pouvaient encore s'assimiler à celles de la région centrale. Cela résulte de l'exposé suivant.

Un sondage fait en 1830 à La Fare a donné la coupe verticale Pl. V, *fig.* 4, dont les *fig.* 5 à 8 donnent le détail pour les bancs de charbon traversés. Il est impossible de méconnaître dans les couches P, Q, R et S la succession connue du Gros-Rocher à la Grande-Mine.

J'ai relevé moi-même, en 1877, dans des vieux travaux de la concession de Coudoux, la succession représentée par la *fig.* 9 et les détails des *fig.* 10 à 12. Or il est également facile de reconnaître à première vue, pour ainsi dire, les assimilations suivantes, et si l'on peut s'étonner d'une chose, c'est de pouvoir les affirmer d'une façon aussi probable lorsque l'on observe qu'il n'y a pas moins de 28 kilomètres à vol d'oiseau entre le point le plus rapproché des régions exploitées et La Fare.

RÉGION EXPLOITÉE.	CONCESSION DE LA FARE.	CONCESSION DE COUDOUX.	OBSERVATIONS.
Gros-Rocher.	P	D	Les filets C représentent ou la mine de l'Eau ou les filets placés parfois entre elle et Gros-Rocher.
Quatre Pans.	Q	E	
Mauvaise-Mine. . . .	R	(?)	
Grande-Mine. . . .	S	B	

Cette correspondance me paraît avoir une importance considérable : elle implique, suivant moi, la continuité des couches exploitables dans toute l'étendue du bassin de Fuveau, et démontre que les exploitants, en quelque point de la vallée qu'il leur conviendra de foncer un puits d'exploitation, seront sûrs de rencontrer non pas seulement le groupe fuvélien mais les couches exploitables. La puissance productive du bassin n'aura donc pour limite que la profondeur des puits.

L'importance de cette déduction m'a semblé justifier le développement que j'ai cru devoir donner à ces détails un peu en dehors de l'objet essentiel de ce travail.

Reprenons maintenant l'examen de l'allure des couches dans la partie exploitée du bassin.

C'est dans la région sud de cette partie que se trouvent les deux grandes failles F et F' seulement mentionnées au § 2 du chapitre Ier, et sur lesquelles je reviens maintenant. La faille de Garoute ou de Doria (F), qui passe à la maison dite de Garoute (Pl. I), suit le chemin conduisant au château de Valdonne et va finir au promontoire de la Pomme après avoir passé auprès du pont qui précède la gare de Valdonne, met l'affleurement de la grande mine en opposition avec les argiles voisines des grès de la Bégude et accuse ainsi une dénivellation de 350 mètres environ en verticale. Tout ce qui est à l'est de cette faille porte le nom de quartier de la Baume-des-Marrons.

La faille F' termine à son tour ce quartier et redescendant encore les couches dans le bassin secondaire de la Bouilladisse de 200 mètres environ, amène la grande mine dans la région de la concession d'Auriol où elle a été exploitée par le puits du Soleil, et où elle vient se serrer et expirer au hameau des Boyers. Enfin, une troisième grande faille (F''), plus importante encore que les deux précédentes et beaucoup moins simple dans ses effets, constitue un trait tout à fait essentiel du bassin, c'est la faille de la Diote, du nom du hameau près duquel elle commence, pour s'étendre vers l'ouest jusqu'au delà du méridien de Gardanne; elle relève les couches inférieures du bassin de manière que tout l'étage fuvélien (Grande-Mine et ses satellites), réapparaît au sud de l'accident, alors qu'au nord il est à des profondeurs considérables. La direction de ce grand accident est E. 12° à 13° S. à O. 12° à 13° N. Son amplitude varie de 600 à 720 mètres de hauteur verticale, selon les points où on le considère (650 mètres près de

l'ancien puits Bouscarle. 720 mètres au nord du puits dit de Deux-Pans, dans le vallon de Péchiers, 590 mètres au nord du puits Fourneau) Un des points où l'on peut le mieux constater cette énorme dénivellation est au sud de Gardanne; à l'extrémité de la colline dite des Angles, c'est-à-dire sur le prolongement manifeste de la barre calcaire qui, à Châteauneuf-le-Rouge, renferme quelques petites ravettes qu'on peut reconnaître même au défaut de la colline, ou sous le village même de Gardanne. Là se trouve un vieux moulin à vent. On est en face, en se tournant vers le sud, de la grande faille de la Diote; elle porte le nom caractéristique local de l'Avalanche; de l'autre côté de cette ligne on trouve les affleurements de la Barre-Jaune, si connue des mineurs. Il y a 700 mètres de distance verticale entre les deux niveaux qui se trouvent là en apposition.

Il est bon de noter que cette faille de la Diote ne se prolonge point beaucoup plus loin que le hameau dont elle a reçu le nom. Entre ce dernier et le chemin qui conduit à Gréasque, elle finit tout à coup; ni l'affleurement de la barre des meules de la Bégude qui passe à la campagne des Jérômes, ni à plus forte raison les travaux intérieurs dans la région du puits Bonaventure n'en offrent la moindre trace. Ainsi ce mouvement énorme de bas en haut qui, au puits du Fourneau, est de 600 mètres environ verticalement, et qui vient de l'ouest sur une longueur de 10 kilomètres au moins (pont de Bouc), s'arrête presque brusquement. Cela ne peut avoir lieu, et n'a lieu, en effet, que par suite d'une cassure dans un sens tout différent qui part du puits de Fourneau et que les anciens travaux de cette région ont parfaitement mise en lumière. Elle passe au moins dans sa manifestation principale par où près les maisons Rey et Leou avec une direction N.-O. à S.-E., et va se rattacher aux grands escarpements calcaires secondaires anciens qui se dressent derrière le village de Saint-Savournin.

En réalité, cette fin presque brusque et non en boutonnière de la faille de la Diote n'est pas due à la cassure unique de Rey et Leou; il y a eu étoilement et c'est ainsi que, partant d'un point unique situé à 300 mètres du puits du Fourneau, vers le nord, on voit dans l'angle existant entre la branche précitée et le prolongement de la grande faille, vers la Diote, une série de coupures divergentes aussi évidentes que difficiles à bien relever à cause de leur multiplicité, et surtout au sommet de l'angle. Mentionnons parmi les faits les plus frappants qui se présentent dans cet angle d'étoilement l'affleurement de la Barre-Jaune, dans la *petite* plaine au sud du hameau de la Diote, venant en apposition avec l'affleurement de la couche dite mine de Bidaou, située, comme on l'a déjà dit, au-dessus des barres des meules de la Bégude. Les positions dans la série de ces deux horizons étant parfaitement connues, on peut estimer, au droit de la Diote, l'amplitude de l'accident à 300 mètres, et ce avec la rigueur que comporte des considérations de cette espèce.

Les trois grandes failles dont je viens de parler divisent donc en quatre grands lambeaux d'importance très inégale, mais toujours notable, toujours exploitable, le bassin de Fuveau.

Mais ce ne sont pas les seules qui aient fait réapparaître la Grande-Mine et ses couches subordonnées par des dénivellations tout à fait comparables à celles dont je viens de parler, et cela dans l'étendue des territoires concédés. Bien que l'une d'elles n'ait certainement aucune importance industrielle et que l'autre n'en puisse avoir qu'une au plus médiocre, il n'est pas indifférent de parler d'autres failles complétant une connaissance plus détaillée du bassin. Le premier accident en question se voit au sommet du ravin dit de Cauvet, qui passe non loin des maisons dites Jean-Claude et les Moulières dans la partie comprise entre la route de Simiane à Mimet et le chemin qui lui est parallèle et qui

court à 250 mètres du premier pour se rendre également à Mimet. Si l'on mène une coupe verticale dirigée nord-sud, on obtient la *fig.* 2, Pl. II, dont la *fig.* 3 donne le détail dans la partie la plus intéressante. La partie comprise entre les deux chemins est, à n'en pas douter, l'étage fuvélien (Grande-Mine et ses congénères) avec tous ses fossiles et même la possibilité d'assimiler terme à terme les affleurements qui s'y voient aux couches connues dans le centre du bassin. C'est ainsi qu'on reconnaît successivement : la Ravette-du-Diable, à 5 mètres au-dessous de la Grande-Mine avec son clovisseux, la Mauvaise-Mine, les Trois-Ravettes, puis le banc de calcaire à ciment, et enfin un ensemble de filets charbonneux représentant évidemment Quatre-Pans. A mesure qu'on remonte vers le sud le pendage augmente : de 30 p. 100 à la mine du Diable, il est de 1/1 à la Mauvaise-Mine, et à Quatre-Pans de 60° environ. A quelques mètres plus haut que le lacis de filets charbonneux qui représente Quatre-Pans, les couches se rapprochent encore de la verticale, et en atteignant le chemin supérieur on est en pleine faille, présentant des débris plus ou moins désagrégés. En poursuivant la coupe vers le sud, on traverse le chemin et l'on tombe sur le Valdonnien (*Melanopsis gallo-provincialis* à profusion), puis au pied même de l'escarpement calcaire secondaire, un ancien petit puits se rencontre où la présence de rognons de fer carbonaté et d'indices de charbon (couche du plan d'Aups) révèlent le Santonien. Plus au sud, on ne tarde pas à rencontrer, au Pas-de-Portes, les bancs à *Hippurites organisans*, qui paraissent reposer sur les couches du plan d'Aups. On a ici un exemple de ces retroussements dont j'ai parlé plus haut, comme régnant tout le long du bord sud du bassin entre Mimet et les Pennes. Cette faille peut s'appeler faille de Gilly, du nom de la maison de campagne voisine du point où je viens de l'indiquer.

Reprenons maintenant la coupe au bas de l'étage fuvé-

lieu. Le filet dit Ravette-du-Diable a son affleurement contigu à un affleurement bien reconnaissable de faille qui a plusieurs mètres d'épaisseur et qui court parallèlement à la route; lorsqu'on traverse cette faille, que j'appellerai faille du Safre, du nom du quartier, on marche sur les argiles de couleur foncée qu'on reconnaît immédiatement comme celles qui surmontent la mine de Bidaou partout où cette couche affleure dans le bassin; et, en effet, après avoir marché vers le nord sur 110 mètres environ, traversé la route de Simiane à Mimet, on aboutit à une petite cascade où les pisolithes à profusion ne laissent aucune incertitude sur le niveau abordé. La couche de Bidaou y a été exploitée tout près de là pour lever les doutes s'il en pouvait rester. Les deux failles paraissent parallèles entre elles, à la chaîne de l'Étoile et à la faille de la Diote. La première, celle de Gilly, qui met les bancs supérieurs à Quatre-Pans en contact avec le Valdonnien, correspond à un relèvement vers le sud de 60 à 80 mètres au moins, l'incertitude étant due à l'épaisseur du Valdonnien et l'amplitude étant considérée comme minima en raison de l'inclinaison des couches qui obligerait à introduire un cosinus en dénominateur. La seconde faille, celle du Safre, qui passe au sud de la route de Mimet à Simiane, correspond à un relèvement vers le sud, qu'on peut également chercher à apprécier. Il y a dans le centre du bassin, depuis le banc de pisolithes qui surmonte la mine de Bidaou jusqu'à la petite Ravette-du-Diable, 600 mètres d'épaisseur de couches. D'un autre côté, l'amplitude verticale du mouvement est égale à l'épaisseur des couches divisées par le cosinus de l'inclinaison, quand la direction de la faille est parallèle à la direction des bancs, ce qui est ici sensiblement le cas; enfin le banc des pisolithes affleure au-dessous de la route, et il y a entre lui et l'affleurement de la Ravette-du-Diable une épaisseur de plusieurs mètres d'argile. Pour toutes ces raisons, le chiffre de 600 mètres comme amplitude verti-

cale devrait être considéré comme faible s'il n'intervenait pas une autre cause de réduction, c'est le fait que sur le bord du bassin l'épaisseur a dû diminuer. Diverses considérations, l'inclinaison moyenne des bancs sur le parcours complet de la coupe entre autres, me portent à admettre comme amplitude verticale 300 à 350 mètres au moins.

Si, à partir de la mine de Bidaou, on continue encore la coupe au nord, on voit se succéder dans l'ordre normal descendant tous les bancs de la formation, jusque et y compris la Grande-Mine dont l'affleurement vient butter contre la faille de la Diote à quelques mètres de l'ancienne forge Mallet, puis on rencontre enfin cette dernière faille qui, dans cette partie, dénivelle les couches de 720 mètres en verticale.

Bien que ce travail n'ait pas l'ambition de soulever et encore moins de résoudre des questions de géologie théorique, je me permettrai ici une courte digression : on ne peut s'empêcher de remarquer que nous sommes en présence, dans un espace de moins de 1.500 mètres de largeur, de trois dénivellations d'une amplitude totale de 1.100 à 1.200 mètres environ. Je ne crois pas que l'on puisse contester qu'elles aient été produites par le mouvement de la montagne de l'Étoile à la direction de laquelle sont parallèles les plans de fracture suivant lesquels les divers lambeaux ont joué. Or, cette montagne, qui existait déjà pendant que se déposaient sur des plans certainement horizontaux, sauf sur leurs extrêmes bords, les diverses couches du bassin, cette montagne, dis-je, a aujourd'hui sa crête à 300 ou 350 mètres au plus au-dessus des régions voisines du bassin où nous constatons ces puissantes dénivellations, et la hauteur moyenne au-dessus du niveaux de la mer n'y atteint pas le double, soit 700 mètres. Si donc les coins poussés en l'air étaient restés dans la position qu'ils affectaient, ils auraient dépassé de plusieurs centaines de mètres la chaîne de l'Étoile. Qu'on se représente le long

de la faille de la Diote, ce coin de plusieurs kilomètres de longueur poussé au vide avec une épaisseur de 1.200 à 1.300 mètres dans le sens nord-sud, à 600 ou 700 mètres au-dessus du sol où s'élève aujourd'hui Gardanne. Qu'est-il resté de ce prisme immense? Absolument rien. Et quelle puissance d'érosion ou, à son défaut, quelle autre action physique gigantesque a-t-il fallu pour niveler cette plaine en n'y laissant que les hauteurs plus ou moins insignifiantes qu'on y rencontre? Remarquons, comme suite à ces considérations, que les travaux du quartier Saint-Pierre ont montré la faille de la Diote très plate, son angle avec l'horizontale n'est que de 27° à 30°, au moins dans la région considérée. Ainsi le coin poussé au vide avait sa paroi nord surplombante, et il n'est pas étonnant dès lors que les matériaux en aient été désagrégés et n'aient même jamais été portés à la hauteur correspondante à la différence de niveau des deux lambeaux d'une même couche après la cassure. Il semble que ces matériaux, ne pouvant rester ainsi en encorbellement, devaient s'étaler à mesure qu'ils sortaient, sous l'action de la poussée interne, au pied de la lèvre nord de la cassure, sous la forme d'une longue colline de débris parallèle à la faille et la longeant. Si cela a été ainsi, il n'en reste à coup sûr plus trace, non plus, à ma connaissance, que des agents d'entraînement qui auraient rasé la plaine. Je soumets cette difficulté au lecteur, et je termine cette digression en faisant remarquer que le pendage de la faille de la Diote étant vers le sud, il est probable que celui des deux autres failles parallèles et contemporaines, celles du Safre et de Gilly, est dans le même sens, qu'ainsi on a la reproduction en grand de la figure par laquelle M. Daubrée a représenté le résultat obtenu par lui dans ses expériences sur la formation des lithoclases par voie de pression latérale (Voy. *Études synthétiques*, p. 322, *fig*. 98). L'analogie est complète en ce sens que dans la nature, comme dans la figure, on remarqu

l'exception à la règle de Schmidt relativement au sens du mouvement relatif des fragments contigus.

On peut retrouver le niveau de la Grande-Mine en se transportant à 300 mètres à l'ouest du hameau des Cayols (commune de Bouc), sur la route départementale de Trets à la Malle. En ce point la route longe une colline de 1 kilomètre de longueur, dans lequel on reconnaît l'étage fuvélien parfaitement caractérisé; des profusions de cyrènes striées, des restes abondants de tortues, des affleurements de lignite, des anciens travaux visibles à la surface auprès de puits en ruine ne laissent aucun doute à cet égard. On peut suivre ces indices jusque passé la gare de Bouc-la Malle, et il y a tout lieu de penser qu'ils traversent la route nationale n° 8 et se dirigent plus ou moins loin vers le hameau du Plan-de-Campagne et la commune des Pennes. Les concessions finissent à la route. Pour se rendre compte de la manière dont se fait cette réapparition, on doit diriger une coupe perpendiculaire à la route départementale, soit nord-sud à peu près, partant de derrière le hameau des Chabauds (Voy. Pl. II, *fig*. 4 et 5). A une surface verticale terminant en abrupt des poudingues calcaires contemporains de ceux du Cengle, succèdent des argiles parmi lesquelles on rencontre une barre de grès s'étendant des Chabauds à la maison Fouque et qui a la plus grande analogie avec l'une des barres des meules de la Bégude. Cette barre a l'inclinaison de 70° vers le sud. En se dirigeant alors sur la maison dite Coriolis, on traverse des bancs argileux qui, à mesure qu'on arrive au sommet de la colline, s'entremêlent de bancs de poudingues stratifiés et redressés verticalement. Aucun fossile ne se trouve dans ces argiles; puis à quelques mètres avant d'atteindre la maison précitée, on se trouve tout à coup en plein terrain fuvélien, stratifié comme les poudingues, c'est-à-dire verticalement ou à peu de chose près. On traverse la route départementale, le pont du chemin de fer, où l'on a, à ses pieds dans la tranchée de la voie

ferrée, les bancs les plus caractéristiques de l'étage fuvélien. A 30 ou 40 mètres après le pont, les champs à droite et à gauche du petit chemin que suit la coupe, offrent en abondance les *Melanopsis gallo-provincialis* caractéristiques du Valdonnien, et si l'on continue à cheminer vers le sud, on atteint successivement le Cénomanien, au droit de la maison dite Perroquet, puis l'Aptien caractérisé par ses petites belemnites; et enfin l'ossature de la chaîne qui me paraît, en cette partie du moins, être formée du corallien, représenté par un calcaire blanc cristallin à cassure conchoïde. L'interprétation de la partie nord de cette coupe présente de réelles difficultés. Partons de la partie sud : le renversement de l'Aptien sur le Cénomanien, de celui-ci sur le Santonien (le Turonien avec les Hippurites manque en ce point), du Santonien sur le Valdonnien, du Valdonnien enfin sur le Fuvélien, n'ont rien que de concordant avec ce que nous avons vu ailleurs, notamment à la coupe de Gilly; l'ordre inverse se maintient dans les divers affleurements visibles de charbon; c'est ainsi qu'un vieux puits ayant exploité une mine que les anciens du quartier déclarent avoir été la plus épaisse — évidemment la Grande-Mine — est sur l'affleurement le plus au sud et que les autres passent par-dessus, contrairement à l'ordre normal. Tout cela se rattache au mouvement de poussée horizontale venant du sud déjà pris sur le fait à la coupe de Gilly; mais ce qui s'explique moins bien, c'est le fait de voir pour ainsi dire accolée la formation de la Grande-Mine avec les poudingues verticaux et les argiles qu'ils renferment, sans qu'entre les deux groupes on puisse reconnaître, même en suivant leur limite commune avec le plus d'attention possible, la marque bien nette d'une faille. Et cependant ces poudingues paraissent bien être les mêmes que ceux qu'on voit en couches régulièrement ordonnées, soit à l'ouest de la route nationale, soit à la Petite-Bastide, c'est-à-dire les poudingues des couches du Cengle, lesquels reposant sur les

couches d'argiles rouges de Châteauneuf ne peuvent donner lieu à aucune méprise. Le plan de la faille qui sépare les poudingues des couches à cyrènes ne se distingue-t-il pas nettement à cause de son parallélisme avec les poudingues verticaux? Ou bien faut-il concevoir que les poudingues s'étant déposés à l'origine transgressivement sur les bords des couches fuvéliennes, mais en stratification *quasi* concordantes, et tout ayant été verticalement redressé par la poussée latérale, il n'y ait réellement pas de faille, mais simplement succession locale du Cengle aux couches à cyrènes? L'existence de la faille me semble encore plus acceptable, mais fort heureusement et quoiqu'il en soit, les conséquences pratiques au point de vue de la mise en valeur du bassin sont à peu près indifférentes à l'une ou à 'autre hypothèse.

Des travaux d'étude et d'exploration ont été entrepris sur ce lambeau à lignite de 1871 à 1874; sans entrer dans aucun détail et le plan des travaux sous les yeux, on peut dire qu'ils n'ont pas été couronnés de succès. Bien que poussés à une profondeur de 45 à 50 mètres, conduits en direction sur une longueur de 90 mètres dans la couche qui paraissait la plus favorable et additionnés d'un travers-banc de 120 mètres de longueur, ils n'ont rien trouvé de bon ni comme charbon, ni comme condition d'exploitation. Ce résultat fâcheux ne doit pas cependant, à mon avis, être considéré comme démontrant radicalement l'inexploitabilité du lambeau de la Malle. On peut remarquer que les travaux ont été placés près de l'extrémité orientale de la réapparition des couches; il semble que plus à l'ouest, vers l'ancien puits de Coriolis, par exemple, ou bien au droit de la gare du chemin de fer, on aurait pu rencontrer plus de régularité dans la formation. Mais quoi qu'il en soit de ce point, il reste établi et démontré que, à 250 ou 300 mètres au moins à l'ouest du vieux puits qui marque la fin vers l'est de la réapparition de l'étage fuvélien et à

50 mètres en profondeur, le lambeau de la Malle est inexploitable.

Je termine ici ce qu'il était indispensable de connaître dans la disposition des grandes masses du bassin de Fuveau pour déterminer rationnellement le tracé du grand exutoire projeté. Cette détermination sera la conclusion du présent travail.

§ 2. — *Détermination du tracé.*

Il s'agit d'aller à la mer.

Si l'on jette un coup d'œil sur la carte, on s'aperçoit que le point le plus rapproché de la mer du bassin de Fuveau, envisagé au point de vue des couches exploitables dans les territoires concédés, c'est-à-dire depuis la route nationale n° 8 jusqu'aux exploitations du principal lambeau du bassin, est l'extrémité du lambeau de Gardanne situé au sud de la faille de la Diote, où les anciens avaient percé nombre de petits puits inclinés et où aboutit aujourd'hui la galerie Saint-Pierre. Le point du rivage qui en est d'ailleurs le plus voisin est le fond du golfe de Marseille, dans la région qui s'étend depuis la pointe de Mourepiane jusqu'à l'embouchure du ruisseau dit de Mirabeau. Il semble donc que, sauf quelques flottements que des convenances locales peuvent imposer aux points de départ et d'arrivée, on a là, la ligne de plus courte distance qui devra être prise pour tracé. Toutefois, quand on la creuse, la question se présente avec moins de simplicité.

La première pensée qu'on a eue a été de profiter du voisinage du lambeau de la Malle alors qu'on pouvait le croire parfaitement exploitable pour diriger sur lui la galerie de la mer. On remarque, en effet, que les affleurements de la colline de Coriolis sont à 9 kilomètres au plus du fond du golfe de Marseille, dans la région de Saint-Henri ; sans

nul doute, quelque espérance qu'on pouvait concevoir sur la richesse de cette partie, on n'avait point l'idée qu'elle pût servir pour motiver un si grand travail que celui qu'on envisageait ; mais ici intervenait une autre considération : une fois arrivé dans la région de Coriolis, une fois dans la couche exploitable, ne pouvait-on pas longer la colline de l'Étoile et arriver ainsi, en restant toujours dans la couche, au sud du point où se termine le lambeau de Gardanne à l'ouest. En ce point, un travers-bancs de 1k à 1k 1/2 avait raison des terrains de recouvrement et l'on rentrait ainsi, après 10k à 11k 1/2 au plus de stérile, dans la région de Saint-Pierre, au lieu des 14 ou 15 kilomètres que comporte la ligne droite. De plus, on avait eu le temps, avant d'y parvenir, d'amortir en partie le coût de la galerie par l'exploitation de 5 à 6 kilomètres. En un mot, rien n'était plus séduisant.

La réalisation de ce programme dépendait de deux faits : 1° la présence et l'exploitabilité des couches au niveau de la mer ou, pour dire mieux, un peu au-dessus du niveau de la mer dans la partie où elles sont connues comme affleurement dans la colline de Coriolis; et 2° leur continuation sans interruption importante le long de la chaîne de l'Étoile jusqu'au sud du quartier Saint-Pierre, c'est-à-dire sur 6 kilomètres de longueur environ.

Le premier fait a été résolu négativement par les recherches effectuées de 1871 à 1874 ; on a vu plus haut que leurs résultats avaient été très peu encourageants au niveau de 45 à 50 mètres au-dessous du sol. L'eussent-elles été à 100 ou 150 mètres plus bas? Cela paraît fort peu vraisemblable. Les travaux ont appris entre autres choses que les bancs de charbon, au lieu de prononcer en descendant le mouvement de plissement qu'on peut leur supposer en devenant d'abord tout à fait verticaux pour reprendre ensuite un pendage vers le nord, tendraient plutôt à s'éloigner de la verticale en conservant leur inclinaison au

sud, mais en s'applatissant au lieu de se redresser; c'est ainsi que de 85° avec l'horizontale au jour, l'inclinaison n'est plus que 72° à 45 mètres de profondeur et toujours vers le sud. Cela fait supposer qu'à la profondeur de 190 à 200 mètres au-dessous du niveau du sol, soit à 20 ou 30 mètres au-dessus du niveau de la mer, niveau où la galerie de la mer viendrait rencontrer le prolongement hypothétique de ces bancs, ou ils n'existeront plus, ou ils seront morcelés, étirés, encore plus inexploitables qu'auprès du jour, accolés au terrain soulevant.

Toutefois, admettons-les au contraire exploitables. Le second point nécessaire reste à résoudre. Que faut-il penser de leur continuation le long de la chaîne de l'Étoile? Les terrains cultivés qui s'étendent à partir de la chute de la colline de Coriolis du côté de l'Est, sont-ils ou féconds ou stériles? Ce point a toujours vivement préoccupé, et la réponse à cette question est difficile à donner d'une manière absolument péremptoire sans travaux souterrains, car le terrain cultivé s'oppose à toute investigation de surface presque partout; néanmoins un point intermédiaire peut fournir à cet égard un enseignement précieux. A mi-chemin, entre la fin de la colline de Coriolis et le village de Simiane, se trouve une colline allongée de l'ouest à l'est sur la rive droite du ravin de Siège. La coupe nord-sud de cette colline donne la *fig.* 6 de la Pl. II, qui montre les couches de pisolithes calcaires, cortège de la couche de Bidaou accolées au sud de la butte aux couches à cyrènes du fuvélien. Aux couches fuvéliennes succèdent les couches valdonniennes à mélanopsis comme à la coupe de Coriolis, puis l'étage du plan d'Aups décélé par les fossiles santoniens (turritelles en abondance) et par les rognons de fer lithoïde; les hippurites turoniennes ne s'y voient pas; celles-ci ne paraissent pas dépasser Simiane où on les rencontre au midi de l'église; mais au sud de la bande santonienne, on retrouve, comme à Perroquet, le cénoma-

nien, puis l'aptien, toujours renversés et paraissant s'enfoncer sous le corallien de la cascade de Siège.

Il suit de là que le fuvélien passe bien encore en ce point, mais resserré entre la faille au sud de la butte et la réapparition de l'étage à Mélanopsis. En mesurant très exactement la distance entre les dernières couches pisolithiques visibles qui ne sont certainement pas la fin du groupe en ce point et l'apparition des mélanopsis qu'on rencontre en abondance dans les terres cultivées, on trouve 90 mètres. Ainsi, c'est dans cet espace de 90 mètres que, s'il n'y avait pas faille en ce point, devrait se loger toute l'épaisseur qui sépare le valdonnien des bancs à pisolithes, soit 600 mètres environ. Il y a donc eu là indubitablement un relèvement qui a porté le valdonnien à 600 mètres au-dessus de sa position primitive. Où trouver là le passage des couches exploitables? Impossibilité absolue. En remarquant que la couleur de la terre végétale de grisâtre et claire devient brusquement rougeâtre et foncée à 45 mètres au sud de la butte, on peut fixer sans grande indécision le passage de la faille qui accole les argiles des deux groupes. C'est ce qu'on peut appeler la faille de Siège.

Un dernier mot : transportons-nous plus à l'est encore, au voisinage de la maison Léon Raphaël. En remontant le ravin du Grand-Babol, à son voisinage, on arrive à une apparition de la couche du plan d'Aups bien reconnaissable; elle plonge au sud selon la règle générale; si, partant de là, on marche vers le nord, quelque temps qu'on y consacre et maintes fois je l'ai tenté, il est impossible de reconnaître entre ce point et la route de Mimet à Simiane, où l'on est en plein dans les argiles et calcaires bégudiens, le passage des cyrènes striées ou des mélanopsis. Les argiles bégudiennes sont là, selon toute probabilité, accolées à l'étage du plan d'Aups, ce qui suppose une amplitude de rejet plus colossale encore que celles précédemment indiquées.

Concluons donc sans plus nous étendre, qu'en comptant sur les deux conditions exigibles pour adopter le tracé brisé par la Malle, savoir la continuité et l'exploitabilité d'une bande de Grande Mine tout le long de la chaîne de l'Étoile à la profondeur de la future galerie, on se préparerait les plus graves mécomptes. Observons d'ailleurs que rien n'empêchera, quand on aura atteint la Grande-Mine par le tracé direct, de diriger à l'ouest tout aussi bien qu'à l'est des galeries d'exploitation. L'idée du tracé brisé par la Malle a donc été définitivement abandonnée et l'on en est revenu au tracé de la plus courte distance en ligne droite entre le *littoral* et l'extrémité occidentale connue du lambeau de Gardanne. La galerie se dirigera, à très peu près, sur l'orifice de l'ancienne galerie Mallet; elle atteindra la Grande-*Mine* à la cote 57, si on lui donne 3 millimètres de pente; elle se développera alors sur 3.500 mètres de longueur et arrivée dans la région du puits du Fourneau, elle atteindra le lambeau principal, après un nouveau travers-banc de 2.000 mètres environ, à 500 mètres au sud de Gréasque. A ce point elle pourra, se retournant à angle droit, aller drainer toute la Grande-Mine jusqu'à Trets, l'extrémité orientale du bassin, qu'elle atteindra après un parcours *total* de 37 kilomètres depuis son orifice, parcours qu'on pourra porter à 40 kilomètres en comptant la branche sud qu'on détachera nécessairement pour venir à l'aval du puits *Léonie*. La quantité de charbon qu'elle permettra d'extraire sans épuisement sera de 25 millions de tonnes environ.

La pente de 3 millimètres qu'on a supposée est bien supérieure, comme on le sait, aux déclivités qu'on s'accorde à donner aux galeries d'écoulement. Si l'on donne la pente de 1/2 à 1 millimètre, bien suffisante pour écouler des masses d'eau considérables surtout dans des parois régulières, la quantité de tonnes asséchées naturellement se trouve monter à 40.000.000 environ.

Le point de départ, avons nous dit, doit être quelque

part dans la région qui s'étend de Mourepiane ou même de Saint-Henri jusqu'au ruisseau de Mirabeau, ou même plus près de Marseille. Il faudrait recourir à des considérations d'ordre divers et probablement secondaire pour fixer le point précis de départ, s'il n'intervenait pas maintenant une considération d'une importance capitale qui resserre immédiatement le champ des recherches et impose la sortie la plus voisine possible de la ville de Marseille.

C'est qu'en effet, dans tout ce qui a été dit jusqu'à présent, on n'a jamais considéré la galerie à la mer qu'à un seul point de vue, celui qui a présidé à sa conception : l'exhaustion du bassin.

Mais si ce point de vue est primordial et essentiel, il est certainement incomplet.

On ne voit pas ce qui empêcherait de profiter de cette percée faisant communiquer le rivage marseillais avec les chantiers d'abatage pour la sortie de tous les produits devant se rendre à Marseille pour l'industrie locale ou l'exportation. Aujourd'hui le charbon arrive aux gares d'expédition (Gardanne, Valdonne, Trets) en le remontant par des puits de 200 mètres de profondeur moyenne, aprés l'avoir roulé en des galeries de plusieurs kilomètres de longueur. Il y a ensuite de 25 à 45 kilomètres à parcourir pour arriver par chemin de fer aux gares de Marseille. Il y a là des dépenses dont il n'est pas nécessaire de donner ici le coût et le détail, mais dont on conçoit l'importance. Pourquoi ne profiterait-on pas de la galerie de la mer pour supprimer ce long et coûteux circuit, et qui empêcherait de réaliser dans les Bouches-du-Rhône sur 20 ou 30 kilomètres ce que le Gard donne en exemple depuis cinq années aux mines de Cessous sur 5 ½ kilomètres? Les avantages économiques qu'on a pu réaliser à Cessous sont à coup sûr minimes en comparaison de ceux que la substitution en question procurerait aux charbons du bassin lignitifère, et si l'on remarque que ces derniers, de valeur intrinsèque

moins grande, commandent en quelque sorte la plus stricte économie dans leurs moyens de production, n'y a-t-il pas là comme un faisceau d'arguments pour faire servir à l'extraction comme à l'écoulement le grand travail dont l'exécution ne saurait être plus longtemps différée? A titre de simple aperçu quelques chiffres peuvent rendre sensibles les avantages dont nous parlons.

Une tonne de charbon destinée à l'exportation et partant du centre du bassin, par exemple, du puits Castellane, est grevée de $0^f,35$ à $0^f,40$ de montage, $3^f,30$ de transport jusqu'à Marseille-Joliette, $0^f,80$ de traction de la gare de la *Joliette* au môle de l'Abattoir, soit un total de $4^f,50$ (*). Admettons, au contraire, qu'elle sorte par la galerie de la mer. En acceptant comme frais de transport par tonne ce qui résulte des chiffres de Cessous publiés par M. Bessard (*Bulletin de la Société de l'industrie minérale*, 2e livraison, 1881), on voit que la tonne arriverait à la mer chargée de $1^f,085$. On doit y ajouter l'amortissement de ce grand travail qui, si l'on veut compter très largement et de manière à éviter tout mécompte, peut être évalué de 4 à 5 millions, et dont l'amortissement devra être ajouté au chiffre de $1^f,085$ cité plus haut. Faisons-le porter sur une quantité de 300.000 tonnes seulement sortant annuellement de la galerie, et supposons qu'on veuille amortir en huit années. On trouve pour amortissement $2^f,58$ par tonne, ce qui, ajouté à $1^f,085$ et comparé à $3^f,85$, laisse déjà une petite marge de bénéfice. On peut donc dire qu'on aurait gagné la galerie en ce laps de temps sans compter, bien entendu, l'économie faite sur les épuisements qui, on l'a vu, peut s'élever jusqu'à $1^f,30$ par tonne, et qui ne peut manquer d'aller sans cesse en croissant.

(*) En réalité, depuis avril, il est un peu moindre par suite d'une légère réduction sur le transport de Valdonne à Marseille-Joliette qui ramène de $4^f,50$ à $3^f,85$ le prix total.

Quelque changement qu'apportent l'exécution des travaux et la revision ultérieure des tarifs, il ne semble pas vraisemblable que le sens dans lequel la comparaison des chiffres montre l'économie puisse être renversé, et la conclusion qu'on est en droit d'en tirer, c'est que, commandée par la nécessité la plus absolue au point de vue de l'assèchement, la galerie s'impose indépendamment comme moyen d'exploitation, à la condition qu'on la dirige et qu'on la dispose en raison du double but à remplir.

Ce double but exige pour le sortage intensif une pente de 3 millimètres environ ; pour l'écoulement, une déclivité de 1/2 à 1 millimètre suffit. *Il faut donc en réalité deux galeries;* la seconde sera faite quand la première, une fois terminée (celle à forte pente), on pourra l'attaquer par des lunettes en autant de points que l'on voudra, pour ainsi dire. Cela sera la véritable galerie d'écoulement ; elle ne présentera pas autre chose, sur une échelle grandiose, que ce que dans l'exploitation actuelle de Fuveau on appelle *le Niveau.*

Mais s'il est reconnu que, logiquement, la percée de l'Étoile doit être à la fois utilisée pour le sortage du charbon en même temps que l'écoulement, il n'y a plus à chercher où il convient de la faire aboutir sur le rivage : c'est nécessairement au plus près possible des ports de Marseille.

Et c'est ainsi que, par une suite de déductions paraissant assez serrées, s'est imposé l'emplacement actuellement choisi.

Et c'est aussi ce qui permet d'examiner rapidement maintenant une autre solution, qui a été mise en avant il y a peu de temps, et qui se présentait avec certains côtés séduisants. C'était, à vrai dire, la reprise de l'idée du tracé par la Malle, mais appliquée à un autre point du rivage.

Le bassin de Fuveau ne se termine pas à la route d'Aix à Marseille ; dans la vallée des Pennes et jusqu'au bord de l'étang de Bolmon et de l'étang de Berre, on voit les couches

supérieures des groupes de Rognac et de Vitrolles se profiler sur de grandes étendues. On s'est demandé si, en partant soit d'un point quelconque de ces étangs, à la cote zéro, soit d'un point un peu plus avant dans les terres, mais à une cote encore assez basse, on ne pourrait pas, à l'aide d'un court travers-banc dirigé du nord au sud rejoindre le long de la chaîne de l'Étoile, et par conséquent *sans avoir à traverser celle-ci*, les couches exploitées dans les concessions aujourd'hui en activité. Avec ce système, dit-on, peu de travers-bancs, possibilité d'attaquer la galerie en nombre de puits dont la profondeur moyenne serait médiocre et qui sans doute n'offriraient pas de très grandes difficultés d'épuisement.

On a vu que dans le système exposé dans le cours de ce travail, tout se tient dans les deux buts que remplira le grand ouvrage à réaliser. Mais laissons pour un moment ce point de vue de côté. Ne tenons pas compte de la longueur de 22 kilomètres de ligne droite qui sépare le point le plus rapproché de l'étang de Bolmon de l'extrémité occidentale connue de la Grande-Mine au quartier Saint-Pierre; de la hauteur nécessairement perdue proportionnellement à cette distance; du travers-banc de 2 kilomètres au moins qu'il faudrait faire à l'extrémité ouest de l'ouvrage; admettons que les puits à faire sur toute cette ligne puissent se faire économiquement, sans épuisement trop coûteux, — et si l'on se reporte à ce que j'ai dit plus haut du coût de la galerie du Rocher-Bleu, on se convaincra que c'est là une concession bien grave faite à la simplification de la discussion, surtout si l'on observe que les puits auraient une profondeur moyenne supérieure à 100 mètres, — encore faut-il que les couches de charbon existent à la profondeur convenable sur toute ou presque toute la lisière de la chaîne de l'Étoile.

Or, c'est justement cela qui est absolument improbable, disons mieux, qui n'existe pas. Ce qui a pu tromper sur

l'existence des couches de Grande-Mine et autres, c'est celle de certains affleurements en divers points de la vallée des Pennes et de Marignane; mais l'on a vu plus haut qu'il y a au moins quatre niveaux de lignite dans le système de Fuveau. Le régime de morcellement que j'ai fait connaître dans la partie étudiée en détail du versant de l'Étoile se continue vers les Pennes, et il y a aussi peu de chance de rencontrer les couches exploitables à la profondeur voulue, à l'ouest ainsi qu'à l'est de la route de Marseille à Aix. On en a d'ailleurs une preuve palpable et, suivant moi, sans réplique : le souterrain de la Nerthe a percé la chaîne à la cote 53,26; on y voit à la tranchée de Rebuty reposer, sur les couches aptiennes parfaitement caractérisées, des argiles et des poudingues qui d'abord, presque verticaux, viennent, en adoucissant peu à peu leur pente, passer sous les grands escarpements de Pas-des-Lanciers; c'est là l'étage de Rognac, et c'est par là que débute la formation de Fuveau dans l'axe du tunnel. Tout ce qui est audessous dans le centre du bassin manque ici.

Ce serait donc un leurre d'espérer cheminer dans les couches de charbon par le tracé que j'examine en ce moment.

Il faut de toute nécessité couper la chaîne et amener dans le golfe même de Marseille les charbons que recèle l'important bassin qui l'avoisine et les quantités d'eaux formidables qui en ont jusqu'ici grevé le prix de revient et plus ou moins paralysé l'exploitation.

COMMISSION D'ÉTUDE

DES MOYENS PROPRES A PRÉVENIR LES EXPLOSIONS DE GRISOU

DANS LES HOUILLÈRES

ANALYSE SYNOPTIQUE

DES RAPPORTS OFFICIELS

SUR LES

ACCIDENTS DE GRISOU EN FRANCE

DE 1817 A 1881,

DRESSÉE AU NOM DE LA COMMISSION

Par MM. JULES PETITDIDIER et CHARLES LALLEMAND,
Ingénieurs au corps des Mines.

Troisième fascicule (*).

NOTE PRÉLIMINAIRE.

Le présent fascicule (le second relatif au bassin de la Loire) comprend 83 accidents survenus dans les sept concessions de Villars, la Péronnière, la Chazotte, le Montcel, Méons, Comberigole et Terrenoire.

M. G. Chesneau, ingénieur des mines, a bien voulu revoir le manuscrit et les épreuves de cette livraison. Nous tenons à lui adresser ici tous nos remerciements pour le concours dévoué qu'il nous a apporté.

Paris, le 15 septembre 1883.

(*) Voir pour les deux premiers fascicules, *Annales des mines*, année 1882, 1er vol., p. 293, et 2e vol., p. 393.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

6. — Concession

(Instituée par décret

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
169	1840 25 Mai	Puits Beaunier — 8e couche.	»	3 Brûlés assez grièvement.	5	1.664	Chantier en cul-de-sac.	Lampe à feu nu.	»
170	id. 17 Octobre	id. — id.	»	1 Brûlé.	id.	id.	?	Lampe de sûreté dont le treillis avait rougi.	Imprudence de la victime, qui portait sa lampe inclinée.
171	1842 8 Juillet	id. — id.	4 Brûlés.	»	100	31.338	?	? id.	? Imprudence de la victime, qui aura abaissé sa lampe en la voyant rougir.
172	1846 12 Décembre	Puits Villefosse.	1 Brûlé.	»	75	23.170	Chantier en cul-de-sac.	Lampe à feu nu.	»
173	1849 19 Septembre	Fendue de Villars — 8e couche.	»	1 Brûlé légèrement.	44	12.601	Chantier en forme de cloche.	Lampe détamisée.	Imprudence [de] la victime, [qui] avait ouvert [sa] lampe.
174	1850 3 Juillet	id.	5 Brûlés.	»	88	31.100	? Dégagement subit de grisou dans une remontée en percement.	? Passage de la flamme	»

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire *(Suite)*.

de Villars.

du 16 Mai 1780).

OBSERVATIONS.
11
Indications générales. — L'aérage se faisait au moyen d'un ventilateur. Il était satisfaisant. **Circonstances de l'accident.** — Trois ouvriers travaillaient avec des lampes à feu nu dans un chantier en cul-de-sac. Le grisou, chassé par un ventilateur qui se trouvait au fond de ce chantier, prit feu sur une des lampes à feu nu et brûla les 3 ouvriers assez grièvement.
Circonstances de l'accident. — Un ouvrier marchait avec sa lampe inclinée ; il ne s'aperçut pas que le treillis rougissait ; le grisou prit feu et lui fit des brûlures assez graves.
Circonstances de l'accident. — Quatre ouvriers travaillaient dans un chantier lorsqu'une explosion de grisou se produisit et les brûla tous les quatre mortellement. **Remarques particulières.** — La cause de cet accident ne peut être attribuée qu'à l'imprudence de l'une des victimes, qui, voyant le treillis de sa lampe rougir, l'aura abaissée brusquement, ou à un défaut de surveillance du lampiste, qui n'aurait pas remis aux ouvriers des lampes en bon état.
Circonstances de l'accident. — Un ouvrier se rendait à son travail dans un chantier en cul-de-sac. A peine était il arrivé, que le grisou qui y était accumulé s'enflamma sur sa lampe de sûreté et le brûla mortellement.
Circonstances de l'accident. — Un ouvrier pratiquait au front de taille d'une galerie une rouillure formant cloche ; n'y voyant pas assez clair, il ouvrit sa lampe et la suspendit auprès de lui après l'avoir détamisée. Le gaz s'accumula bientôt dans la cloche, prit feu sans explosion et le brûla légèrement.
Circonstances de l'accident. — On perçait une remontée dans le 3e niveau de fond de la fendue de Villars ; le percement, commencé par les deux bouts, était continué en remontant. Après une explosion de grisou dont les circonstances sont restées inconnues, on rentra immédiatement dans les travaux et on trouva les 5 ouvriers qui travaillaient au percement, dans la partie supérieure de la remontée, où ils

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

2. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT Causes directes de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT Causes directes de l'inflammation du gaz. 9	Causes directes. 10
						Tonnes		hors du treillis d'une lampe de sûreté tombée à terre, ou posée sur le sol dans une position fortement inclinée.	
175	1855 13 Juillet	Vendue de Villars.	»	1 Brûlé assez grièvement.	95	17.605	Chantier en remonte.	Lampe de sûreté fortement inclinée par le mouvement brusque que fit un ouvrier sur le point de tomber.	Cause fortuite.
176	1858 20 Janvier	Id.	1 Brûlé.	6 Brûlés.	98	25.336	Disposition en cul-de-sac d'une remontée en percement, insuffisamment aérée.	Lampe de sûreté ouverte	? Imprudence de l'une des victimes, qui aurait dévissé sa lampe pour y allumer sa pipe.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a — Département de la Loire.

de Villars (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

étaient probablement allés étayer le chantier ; l'un d'eux était mort, les quatre autres grièvement blessés succombèrent aux suites de leurs brûlures.

Remarques particulières. — Quelques lampes ont été brisées, mais aucun éboulement ne s'est produit et aucun cadre n'a été arraché. Les bois étaient noircis.

On a supposé qu'un dégagement subit de gaz avait fait fuir les ouvriers et qu'une de leurs lampes était tombée ou avait été posée à terre dans une position inclinée.

Les causes de cet accident sont restées obscures, l'état des blessés n'ayant pas permis de les interroger.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier se rendait à son travail dans les travaux de la fendue de Villars. En entrant dans la remontée où se trouvait son chantier, il fit un faux pas sur le sol glissant de la galerie et éleva les bras pour se retenir au boisage ; dans ce mouvement, sa lampe fortement inclinée, mit le feu à une petite quantité de grisou accumulé au toit ; l'ouvrier fut brûlé assez grièvement.

Indications générales. — Au bout d'une galerie de niveau, à 140^{m} environ de la fendue de Villars, on perçait une remontée qui devait aboutir à un niveau supérieur. Comme le dégagement du grisou était abondant, on avait placé un ventilateur au bas de la remontée pour remplacer les gaz de cette dernière par l'air puisé dans la galerie de niveau. Tous les jours, avant le travail, on faisait jouer le ventilateur.

Circonstances de l'accident. — Pendant que des ouvriers attendaient que leurs chantiers fussent purgés, une explosion eut lieu ; tous, au nombre de 7, furent brûlés ; l'un d'eux mourût des suites de ses blessures.

Remarques particulières. — Le gaz chassé par le ventilateur s'est enflammé sur une lampe de sûreté dévissée.

Une des victimes a prétendu qu'un de ses camarades avait ouvert sa lampe pour y allumer sa pipe ; ce dernier a nié le fait, mais n'a pu expliquer par quel hasard sa lampe avait été trouvée dévissée. Les lampes de sûreté étaient bien entretenues et fermées avec autant de soin que possible. Il est donc probable que la lampe retrouvée ouverte l'avait été volontairement

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

6. — Concession

N° d'ordre 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
177	1861 2 Septembre.	Puits Gallois.	1 Brûlé.	2 Brûlés légèrement.	265	88.097	Remontée de 10^{m} de longueur située à 9^{m} du courant d'air.	Lampe de sûreté détamisée.	Imprudence de l'une des victimes. Négligence du lampiste qui ne fermait pas les lampes à clef. Défaut de surveillance des ingénieur et gouverneur qui n'avaient pas constaté cet état de choses.
178	1863 22 Mai	Fendue de Villars.	1 Brûlé.	2 Brûlés grièvement.	298	86.740	Galerie de retour d'air.	Lampe de sûreté détamisée.	Imprudence de l'une des victimes, qui avait détamisé sa lampe.
179	1865 30 Janvier	Puits Beaunier	1 Asphyxié.	»	?	89.874	Remontée insuffisamment aérée à l'aide d'un ventilateur et d'une colonne de tuyaux en mauvais état.	Asphyxie par le grisou sans inflammation du gaz.	Imprudence d'un entrepreneur, qui avait envoyé la victime au sommet d'une remontée où il soupçonnait la présence du grisou.

. — GROUPE DE LA LOIRE.

. — Département de la Loire.

Villars (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

L'aérage de la galerie de niveau était suffisant ; mais le ventilateur placé au bas de la remontée ne pouvait envoyer dans celle-ci que de l'air déjà vicié.

Cet accident met en évidence la nécessité de placer dans un courant d'air pur les ventilateurs de chantiers grisouteux.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier travaillait à l'avancement d'un niveau ; ne trouvant pas dans son chantier des écoins qu'il y avait déposés la veille, il pensa qu'on les avait transportés dans une remontée voisine. Il pénétra dans cette remontée, longue de 10m et située à 9m du courant d'air, après avoir détamisé sa lampe pour y voir plus clair. Arrivé près du front de taille, il détermina une petite explosion de grisou qui le brûla mortellement. Deux autres ouvriers qui se trouvaient dans le niveau, à 9m de la remontée, au point de croisement d'un plan incliné dans lequel passait le courant d'air, furent légèrement brûlés.

Remarques particulières. — Le gaz n'était pas abondant dans la partie de la mine où l'accident s'est produit.

Le niveau et la remontée, où a eu lieu l'explosion, n'étaient aérés que par diffusion.

Les lampes de sûreté étaient remises aux ouvriers sans être fermées à clef, malgré l'arrêté préfectoral du 27 juillet 1836 et l'ordre de service de l'Ingénieur principal des houillères de la Loire.

Indications générales. — L'air entrait par la fendue de Villars, suivait le niveau de roulage à 500m de profondeur, remontait un plan incliné à l'extrémité de ce niveau, revenait par le niveau où l'accident s'est produit, en aérant par diffusion les galeries latérales, et se dirigeait vers le puits Beaunier.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier travaillait au boisage d'un niveau où passait le courant d'air ; il détamisa sa lampe de sûreté fermée à clef ; une explosion se produisit et il fut brûlé mortellement.

Deux ouvriers, qui se trouvaient dans une remontée voisine, furent grièvement brûlés.

Remarques particulières. — Après l'accident, le grisou existait au toit du niveau sur 15 à 20 centimètres d'épaisseur.

Circonstances de l'accident. — Une galerie au charbon avait été ouverte au sommet d'une remontée très inclinée, de 30m de longueur et dirigée dans le plan d'un rejet ; cette remontée était aérée au moyen d'un ventilateur et d'une colonne de tuyaux ; mais cette colonne, qui n'arrivait pas jusqu'au sommet, avait été disjointe vers son milieu par des éboulements.

Après un jour de chômage, on déblayait la galerie inférieure pour réparer la conduite, lorsque l'entrepreneur, qui faisait fonction de sous-gouverneur, envoya un ouvrier chercher un outil à l'entrée de la galerie supérieure, en lui recommandant de s'arrêter s'il remarquait la présence du gaz.

Au bout de quelques minutes, les autres ouvriers ne voyant pas revenir leur camarade, montèrent à sa

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

6. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
180	1865 6 Mars	Puits Beaunier	»	1 Brûlé légèrement.	?	89.874	Chômage de 16 heures dans un chantier faiblement grisouteux.	Lampe à feu nu.	Imprudence de l'entrepreneur des travaux, qui aurait dû visiter les chantiers avec une lampe de sûreté avant l'arrivée des ouvriers.
181	1866 30 Mars	Fendue de Villars. — Grande couche.	»	1 Brûlé légèrement.	401	98.084	Aérage par diffusion insuffisant.	Lampe de sûreté ouverte.	Imprudence de la victime qui avait pénétré dans son chantier avec une lampe ouverte.
182	id. 24 Novembre	id. — id.	»	1 Brûlé légèrement.	id.	id.	Remontée en cul-de-sac.	Lampe de sûreté ouverte ou en mauvais état.	Imprudence de la victime. ou Défaut de surveillance dans l'entretien des lampes.

2 — GROUPE DE LA LOIRE

1 — Département de la Loire.

de [illegible] (suite).

OBSERVATIONS.
11
recherche, et, après avoir éprouvé les premiers symptômes de l'asphyxie, purent arriver au sommet de la remontée où ils le trouvèrent asphyxié. **Remarques particulières.** — La lampe de la victime fut retrouvée accrochée à l'un des cadres de la remontée, à une assez grande distance du sommet. L'entrepreneur n'eût pas dû envoyer, sinon sans de grandes précautions, un ouvrier dans la remontée où il soupçonnait la présence du grisou.
Indications générales. — On travaillait à l'approfondissement du puits Beaunier et après avoir traversé 50m de rocher, on avait rencontré une alternance de schistes et de filets charbonneux. Un faible dégagement de grisou ayant été constaté, on avait laissé les lampes à feu nu pour prendre des lampes de sûreté; puis on était revenu aux premières après avoir constaté qu'il ne se dégageait plus de gaz. **Circonstances de l'accident.** — Après un chômage de 16 heures, pendant que l'entrepreneur des travaux inspectait, avec une lampe à feu nu, une galerie voûtée percée au niveau des schistes et filets charbonneux, une subite inflammation de gaz eut lieu. Un ouvrier qui se trouvait près de là fut brûlé très légèrement, l'entrepreneur n'eut aucun mal. **Remarques particulières.** — Quelques jours avant l'accident, après un chômage de 48 heures, l'Ingénieur avait visité le chantier et aucune trace de grisou n'y avait été remarquée; ce qui explique la trop grande confiance de l'entrepreneur dans l'absence du gaz. L'ouvrier légèrement brûlé était nu jusqu'à la ceinture.
Indications générales. — L'aérage ne se faisait que par diffusion. La couche était grisouteuse. Le travail ordinaire se faisait avec des lampes de sûreté. **Circonstances de l'accident.** — On était en train de tracer la fendue. Un ouvrier, en pénétrant dans une petite galerie de niveau percée dans la couche à une petite distance du fond, mit le feu, avec sa lampe de sûreté ouverte à une petite quantité de grisou qui le brûla légèrement.
Circonstances de l'accident. — Un ouvrier pénétrait à l'entrée d'une remontée en cul-de-sac, lorsqu'une petite quantité de grisou s'enflamma sur sa lampe de sûreté et le brûla légèrement. **Remarques particulières.** — L'explosion fut très faible et locale. Il est probable que la victime avait sa lampe ouverte, ou la tenait fortement inclinée.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

6. — Concession

Nº d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
183	1867 11 Octobre	Fendue de Villars.	39 dont plus de la moitié asphyxiés.	»	333	97.665	? Aérage général insuffisant et mal distribué.	? Lampe de sûreté dont le treillis aurait rougi et qui aurait été jetée à terre.	? Imprudence de l'une des victimes qui, voyant rougir le treillis de sa lampe de sûreté, aurait jeté celle-ci à terre.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

de Villars (suite).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'aérage se faisait naturellement. L'air descendait par la fendue, parcourait la galerie inférieure, revenait par la galerie supérieure et se rendait au puits d'un quartier voisin (puits Beaunier). Sa vitesse était relativement faible.

Les travaux du fond de la fendue de Villars se composaient, à droite et à gauche de cette fendue, de deux galeries en direction reliées par des descentes.

Le grisou se montrait en faible quantité dans quelques ouvrages.

Circonstances de l'accident. — Une explosion de grisou se produisit à l'une des extrémités de la galerie supérieure de la fendue de Villars, et se propagea dans les deux galeries jusqu'au delà de la fendue, en déterminant l'éboulement de la galerie supérieure sur une longueur de 65 mètres.

Sur 40 ouvriers travaillant dans les travaux de fond, 39 périrent, dont plus de la moitié par asphyxie.

Remarques particulières. — L'aérage des travaux du fond de la fendue se faisait dans des conditions passables sous le rapport du volume d'air qui pouvait y circuler ; mais il laissait à désirer pour des travaux sujets à des dégagements de grisou, car la vitesse du courant, en certains points inférieure à $0^m 40$ par seconde, devait être insuffisante pour balayer convenablement le gaz. Avec quelques dispositions propres à assurer une bonne distribution, on aurait pu avoir un aérage bien meilleur, tout en conservant la ventilation naturelle.

Deux lampes seulement ont été retrouvées brisées; l'une d'elles, dont le treillis avait perdu sa souplesse, a dû être la cause de l'explosion ; elle appartenait à un boiseur qui devait remplacer quelques cadres brisés; avant de commencer son travail, il a dû, en inspectant le toit de la galerie, faire rougir le treillis de sa lampe et la jeter à terre. Deux autres lampes ont été retrouvées allumées, auprès des cadavres des ouvriers auxquels elles appartenaient et qui avaient péri asphyxiés.

Les dépôts de poussière de charbon et de coke trouvés en petite quantité sur les boisages ont montré que les flammes s'étaient développées sur une grande longueur de galeries. Sur une longueur de 400^m les ouvriers avaient été brûlés ; dans les autres parties, d'un développement plus considérable, la mort avait été le résultat de l'asphyxie.

Dès que les premiers sauveteurs arrivèrent dans la partie inférieure de la fendue, ils éprouvèrent des symptômes d'asphyxie, bien que leurs lampes continuâssent à brûler. Les gaz irrespirables qui ont produit l'asphyxie étaient donc propres à la combustion.

Observations. — Cet accident montre l'insuffisance des lampes à simple treillis métallique, employées alors dans le bassin de la Loire. En raison des grandes dimensions du treillis et de la largeur des mailles la flamme peut facilement passer dans les mélanges explosifs, quand les lampes sont agitées dans ces mélanges ou que ceux-ci ont une certaine vitesse.

Cet accident prouve également que, pour qu'une explosion de grisou prenne de grandes proportions, il n'est pas besoin que le gaz soit en grande abondance ; il suffit qu'en un point déterminé il y en ait assez pour produire une petite explosion locale capable de mettre le feu aux poussières qui la propageront au loin.

De la petite quantité de coke déposée sur les boisages, il ne faudrait pas conclure que les poussières n'aient joué qu'un rôle peu important dans l'accident. Il suffit en effet que la combustion de la poussière de houille soit plus complète pour qu'elle laisse moins de traces, et cette combustion plus complète n'en produit que plus d'effets.

Ces effets ne se bornent pas à de simples accidents locaux ; l'inflammation peut être propagée au loin jusqu'à de nouveaux amas de gaz explosifs ou inflammables ; les effets dynamiques résultant de la combustion des poussières s'ajoutent à ceux de la combustion du grisou ; les poussières en brûlant produisent des gaz irrespirables qui peuvent être plus dangereux que ceux produits par le

A. — MINES DE HOUILLE

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE

6. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10

7. — Concession

(Instituée par décret

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
184	1831 7 Octobre	Puits Piney.	»	1 Blessé légèrement.	?	?	»	Lampe à feu nu.	Imprudence de la victime, qui avait pénétré dans son chantier avec une lampe à feu nu, malgré la défense qui en était faite.
185	1844 15 Octobre	Puits du Chêne. — Grande couche.	1 Brûlé.	»	150	43.550	»	id.	Imprudence de la victime, qui avait pénétré dans son chantier, avant que le gouverneur l'eût visité.
186	1851 10 Novembre	Puits Piney.	»	1 Brûlé assez grièvement.	70	28.005	Chantier en cul-de-sac.	id.	Négligence du gouverneur, qui avait laissé la victime pénétrer,

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de Villars (suite).

OBSERVATIONS.

11

grisou. Enfin, cette poussière de houille enflammée peut quelquefois encore donner lieu au phénomène connu sous le nom de *retour de flamme*.

Le fait des lampes retrouvées allumées près des ouvriers auxquels elles appartenaient, ouvriers qui avaient péri asphyxiés, montre qu'un air propre à la combustion peut être irrespirable; cela arrive quand cet air, tout en renfermant une proportion encore très grande d'oxygène, est vicié par des gaz, tels que l'acide carbonique, qui ne se sont pas formés aux dépens de son oxygène mais se sont simplement mélangés à lui, ou encore lorsque cet air est mélangé à des gaz combustibles délétères tels que l'oxyde de carbone. Dans certaines circonstances, la combustion du grisou et la combustion incomplète des poussières peuvent sans doute donner naissance à ce gaz.

L'aérage naturel, dont on se contentait habituellement dans le bassin de la Loire était souvent insuffisant.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Une circulaire du 14 janvier 1868 a recommandé l'usage de la lampe Mueseler et la ventilation artificielle.

Les exploitants ont adopté la lampe Mueseler.

de la Péronnière.

du 13 Janvier 1842).

Indications générales. — Il était défendu aux ouvriers occupés dans les travaux du puits Piney d'y travailler avec des lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier pénétrait dans un chantier avec une lampe à feu nu. Un peu de grisou qui s'y était accumulé, prit feu et le brûla légèrement.

Remarques particulières. — Simple flambée de gaz.

Indications générales. — Tous les jours avant l'arrivée des ouvriers, le gouverneur visitait les chantiers avec une lampe de sûreté afin de s'assurer de l'absence du grisou.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier, en pénétrant dans son chantier avec une lampe à feu nu, mit le feu à une petite quantité de grisou qui le brûla mortellement.

Remarques particulières. — Le chantier n'était aéré que par diffusion.

Indications générales. — Le grisou ne s'était pas montré depuis plusieurs années dans les travaux du puits Piney. — On y travaillait avec des lampes à feu nu. — Le gouverneur faisait chaque matin, avec une lampe de sûreté, la visite des chantiers avant l'arrivée des ouvriers.

Circonstances de l'accident. — Pendant que le gouverneur faisait sa visite, un ouvrier arrivait à son

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

7. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			avant sa visite, dans un chantier dangereux.
187	1859 8 Janvier	Puits Sainte-Camille.	»	1 Brûlé légèrement.	235	61.175	Chantier en cul-de-sac.	Lampe à feu nu.	Imprudence de la victime, qui s'était servie d'une lampe à feu nu, dans un chantier où la présence du grisou était à craindre.
188	id. 7 Mai	Puits Camille.	»	1 Brûlé légèrement.	id.	id.	Éboulement de charbon friable, ayant produit des cloches au toit d'un chantier.	id.	Imprudence de la victime, qui avait élevé sa lampe à feu nu dans une cloche, malgré les règlements.
189	1861 3 Août.	Puits Sainte-Camille.	»	1 Brûlé légèrement.	295	81.930	Galerie en cul-de-sac, aérée seulement par diffusion.	id.	Négligence du sous-gouverneur qui n'avait pas visité les chantiers avant l'arrivée des ouvriers.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de la Péronnière (*suite*).

OBSERVATIONS.
11
chantier, pensant à tort qu'il avait déjà été visité. Un peu de grisou s'enflamma sur sa lampe à feu nu et le brûla assez grièvement. **Remarques particulières.** — Le chantier de l'accident n'était aéré que par diffusion. Les travaux étaient en plein massif et en remontant ; la présence du grisou était donc à redouter. Le gouverneur n'aurait pas dû permettre qu'un ouvrier pût pénétrer dans son chantier avant la visite.
Indications générales. — L'aérage général était excellent. Le grisou n'avait jamais été reconnu dans les travaux, sauf le matin de l'accident et encore en quantité très faible. Les ouvriers avaient chacun à leur disposition une lampe de sûreté et une lampe à feu nu. **Circonstances de l'accident.** — Le gouverneur et un boiseur remplaçaient, dans un chantier en activité, la traverse d'un cadre situé à 1^m environ du front de taille ; pendant ce travail, un éboulement de faible importance eut lieu, et la lampe de sûreté du sous-gouverneur, qui se trouvait accrochée au sommet du montant droit du cadre, fut couverte et éteinte par une poignée de charbon. Le boiseur prit alors sa lampe à feu nu pour aller retirer celle du sous-gouverneur ; comme il se relevait, une petite explosion eut lieu et le brûla légèrement. **Remarques particulières.** — Les ouvriers ayant chacun à leur disposition une lampe de sûreté, il est difficile de s'expliquer pourquoi la victime, sachant que le grisou existait dans son chantier, avait été chercher sa lampe ordinaire et comment le gouverneur, qui était présent, avait permis cette imprudence. L'emploi des lampes à feu nu aurait dû être interdit puisqu'il y avait des lampes de sûreté.
Indications générales. — On employait les lampes de sûreté dans les galeries sans issues, où on craignait des dégagements de gaz ; dans les galeries à courant d'air, on se servait de lampes ordinaires. Il était expressément défendu aux ouvriers d'élever une lampe à feu nu dans une cloche quelconque ; ils devaient dans ce cas prévenir le gouverneur afin qu'il visitât lui-même le chantier. **Circonstances de l'accident.** — Un ouvrier était occupé au relèvement d'une ancienne galerie de roulage ; il était obligé d'enfoncer au toit des pointes de buttes pour soutenir l'avancement. Le charbon étant friable, il se produisit au toit, dans ce travail, des vides en forme de cloche ; voulant constater l'état de ces vides, l'ouvrier éleva sa lampe à feu nu ; aussitôt une petite quantité de gaz s'enflamma et le brûla légèrement à l'avant bras et au visage.
Indications générales. — L'aérage, bien que se faisant par diffusion, était cependant considéré comme suffisant. Le gouverneur devait visiter les chantiers avant l'arrivée des ouvriers. Lorsque l'absence du grisou y était constatée, on employait des lampes à feu nu. **Circonstances de l'accident.** — Un ouvrier du poste de nuit venait d'arriver à son chantier, à l'extrémité d'une galerie aérée seulement par diffusion, dans une partie de la mine où le grisou se montrait en petite quantité et d'une manière irrégulière ; comme les jours précédents, il était muni d'une lampe à feu nu. Une petite quantité de grisou s'enflamma et lui fit des brûlures sans gravité.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

2. — Concessions de

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
190	1864 19 Juillet	Puits Saint-Antoine.	»	1 Brûlé légèrement.	364	101.155	Dégagement accidentel de grisou dans un chantier en remonte.	Lampe de sûreté détamisée.	Imprudence de la victime, qui était entrée dans son chantier avec sa lampe de sûreté ouverte.
191	1868 1er Janvier	id.	»	1 Brûlé assez grièvement.	381	106.956	Cloche produite par un éboulement au toit d'une galerie.	Lampe à feu nu.	Imprudence de la victime, qui n'avait pas averti le gouverneur, qu'un éboulement avait produit une cloche au toit de son chantier.
192	1870 20 Septembre	Puits Sainte-Camille.	»	1 Brûlé grièvement.	373	89.545	Cloche produite par un éboulement au front d'une taille éloignée de 7m du courant d'air.	id.	Imprudence de la victime, qui avait introduit sa lampe à feu nu dans une cloche, malgré la défense générale qui en avait été faite. Négligence du sous-gouverneur qui ayant constaté l'éboulement n'avait pas remis une lampe de sûreté à l'ouvrier.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

La Péronnière (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Remarques particulières. — La présence du grisou dans ce chantier avait été reconnue dès le matin et le piqueur du jour s'était servi d'une lampe de sûreté; mais le gouverneur de nuit n'ayant pas fait sa visite, la victime n'avait pas été prévenue de la présence du gaz.

Indications générales. — Le grisou ne s'était jamais montré dans les bancs inférieurs à la Grande Couche. Cependant on se servait partout de lampes de sûreté.

Circonstances de l'accident. — On travaillait à un chantier en remonte, de 6m d'avancement, situé à 14m du courant d'air. Un ouvrier venait de prendre son repas et rentrait dans ce chantier avec une lampe Dubrulle qu'il avait rallumée et laissée ouverte. Il éleva sa lampe au toit et détermina une légère explosion qui le brûla légèrement. Un autre ouvrier, qui se trouvait près de lui, ne fut pas atteint.

Indications générales. — Il était expressément recommandé aux ouvriers de ne jamais travailler dans les cloches avant d'avoir averti le gouverneur, afin que ce dernier pût les visiter.

Dès que la présence du grisou était signalée, les ouvriers étaient munis de lampes de sûreté.

Circonstances de l'accident. — Un boiseur travaillait dans une galerie en percement, ayant 15m de longueur et à l'extrémité de laquelle passait le courant d'air; le grisou ne s'y était jamais montré.

Au moment où il allait prendre son repas, un petit éboulement produisit une cloche au toit de la *galerie*, à 5 mètres de l'entrée; il n'en avertit pas le gouverneur Après avoir déjeuné, il retourna à son travail, accrocha sa lampe à feu nu contre un bois et éleva les bras dans la cloche pour se rendre compte de la dimension des bois dont il avait besoin pour la garnir; ce mouvement fit sortir de la cloche une petite quantité de gaz qui s'y trouvait et qui vint s'enflammer sur sa lampe; une explosion eut lieu et le brûla assez grièvement.

Indications générales. — Le gaz avait été rencontré dans cette région lors du traçage; il se montrait encore dans les chantiers en cul-de-sac éloignés du courant d'air. Il était défendu de pénétrer avec une lampe à feu nu dans les cloches produites par des éboulements.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier travaillait dans une taille légèrement montante, dont le front, situé à 7m du courant d'air, s'arrêtait à un redressement de la couche. Pendant qu'il prenait son repas, un éboulement se produisit au toit et contre le front de taille, sur 1m 30 de hauteur. En rentrant au chantier, il voulut examiner avec sa lampe à feu nu le vide produit et détermina ainsi l'inflammation du grisou qui s'y trouvait. Il fut grièvement brûlé.

Remarques particulières. — Il y a eu grande négligence de la part du sous-gouverneur qui, ayant vu l'éboulement, n'avait pas remis à l'ouvrier, victime de l'accident, une lampe de sûreté; ce dernier aurait dû, dans tous les cas, se conformer à la défense générale qui avait été faite.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

7. — Concession de

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
193	1872 8 Juin	Puits Sainte Camille.	»	2 Brûlés grièvement.	532	110.728	Soulèvement de poussières charbonneuses par suite de l'explosion d'un coup de mine.	Flamme produite par le débourrage d'un coup de mine	Cause fortuite.
194	1879 3 Décembre	id.	»	1 Brûlé grièvement.	369	100.059	Cloche de 2m 10 de hauteur produite par un éboulement au toit d'une galerie de retour d'air.	Lampe à feu nu.	Double négligence du gouverneur, qui n'avait pas muni de lampes de sûreté deux ouvriers occupés à la consolidation d'une cloche d'éboulement, et qui n'avait pas fait sa visite quotidienne avant l'arrivée des ouvriers.

8. — Concession

(Instituée par décret

195	1828 Novembre	Puits du Fay. — 14e Couche.	»	2 Brûlés	?	?	Cloche produite par un éboulement au toit d'une galerie.	Lampe à feu nu.	Imprudence de la victime, qui avait élevé sa lampe dans une cloche.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

la Péronnière (*suite*).

OBSERVATIONS.
11
Indications générales. — L'aérage était suffisant. Les galeries et les chantiers du puits Sainte-Camille étaient très secs et très poussiéreux. Parfois, pendant l'abatage du charbon, la poussière était assez abondante pour former un nuage qui interceptait la lumière à moins de 20^{m} de distance. Le grisou ne s'était jamais montré dans le lieu de l'accident. **Circonstances de l'accident.** — Un coup de mine avait été préparé dans un massif de houille adjacent à la voie d'aérage. La charge était de 200 à 220 grammes de poudre. Deux ouvriers, après avoir mis le feu au coup de mine, se retirèrent à une dizaine de mètres dans la voie d'aérage. Aussitôt après l'explosion, ils virent arriver subitement sur eux une flamme éblouissante qui les brûla grièvement. **Remarques particulières.** — On n'a jamais retrouvé trace de grisou dans le chantier après l'accident. On a retrouvé sur les boisages du chantier, sur le plafond et la sole, ainsi que sur les corps des deux victimes de nombreuses particules de charbon carbonisé. Cet accident ne paraît pas être, à proprement parler, un accident de grisou. **Mesures prises à la suite de l'accident.** — Des recommandations ont été faites pour que les chantiers poussiéreux soient arrosés fréquemment.
Indications générales. — La mine dégageait peu de grisou et on n'y employait normalement que des lampes à feu nu. Toutefois le Directeur des travaux avait formellement prescrit de ne pénétrer dans les chantiers en cul-de-sac, cloches d'éboulement, etc., qu'avec des lampes de sûreté. De plus les gouverneurs devaient visiter les chantiers avant l'arrivée des ouvriers. **Circonstances de l'accident.** — Un éboulement de 2^{m} de longueur, sur 1^{m} 50 de largeur et 2^{m} 10 de hauteur, s'était produit au toit d'une galerie d'aérage aboutissant à la recette supérieure du puits Sainte-Camille. Le gouverneur envoya pour réparer le dégât deux ouvriers, sans se préoccuper de les munir de lampes de sûreté. Dès leur arrivée, une inflammation de gaz se produisit et fit à l'un d'eux des brûlures graves. L'autre ne fut pas atteint. **Remarques particulières.** — L'inflammation ne s'est pas propagée au dehors de la cavité et n'a laissé dans celle-ci, ni dépôt de coke, ni trace d'exsudation sur les bois résineux.

de la Chazotte.

du 13 Juillet 1825).

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers étaient occupés dans une galerie ; l'un d'eux, en élevant sa lampe pour voir une cloche produite par un éboulement, mit le feu à une petite quantité de grisou qui le brûla ainsi que son camarade.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

8. — Concession

Nos d'ordre.	DATE de l'accident.	LIEU de l'accident.	NOMBRE d'ouvriers		OUVRIERS au fond.	PRODUCTION annuelle de la mine.	CAUSES DE L'ACCIDENT		
							Causes directes		Causes indirectes.
			Tués.	Blessés.			de l'accumulation du gaz.	de l'inflammation du gaz.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
196	1851 26 Août	Puits Marie. — Couche supérieure du Pré Soleil.	1 Contusionné.	4 Brûlés assez grièvement.	68	19.367	Montage en percement — Expulsion du gaz par un ventilateur actionné au bas du montage.	Lampe à feu nu.	?
197	1856 2 Août	id. — 11e Couche.	»	2 Brûlés légèrement.	271	96.780	?	id.	»
198	1857 22 Janvier	id. — Couche des Rochs.	»	2 Brûlés grièvement.	227	72.414	Remontée abandonnée et barricadée à la suite d'une précédente explosion.	id.	Imprudence de l'une des victimes, qui avait pénétré dans une remontée abandonnée et barricadée.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de la Chazotte (suite).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — Les travaux de la couche supérieure du Pré Soleil étaient très peu développés. Le grisou ne s'y montrait qu'en faible quantité et on se servait de lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident — Avant de reprendre le travail à l'avancement d'un montage, on manœuvrait, au pied de ce dernier, un ventilateur destiné à l'aérer. Quatre ouvriers attendaient à l'extrémité d'un passage ménagé dans les remblais et aboutissant dans le montage, un peu au-dessus du ventilateur, que le sous-gouverneur eût visité le chantier; ils avaient placé auprès d'eux leurs lampes à feu nu.

Une violente explosion se produisit. L'ouvrier qui tournait le ventilateur fut projeté contre un étançon et tué sur le coup; les quatre autres furent roulés à terre et brûlés; les piqueurs de deux chantiers voisins furent transportés à une dizaine de mètres en arrière des points où ils se trouvaient; les dégâts matériels furent presque nuls.

Remarques particulières. — L'ouvrier occupé au ventilateur avait posé sa lampe de sûreté à côté de lui; elle fut retrouvée intacte. D'ailleurs cet ouvrier avait vu venir le feu et avait crié gare avant l'explosion; il est peu probable que sa lampe ait mis le feu au gaz. On a supposé, qu'une partie de l'air chassé du chantier avait suivi le passage ménagé dans les remblais, qu'un filet de gaz était venu s'allumer aux lampes à feu nu placées à l'extrémité, sans que les ouvriers, tournant le dos au passage, s'en fussent aperçus et que le feu s'était propagé par ce passage jusqu'au montage où l'ouvrier manœuvrant le ventilateur l'avait vu et où l'explosion s'était produite.

Indications générales. — La présence du grisou avait été reconnue dans les travaux du Puits Marie, mais en quantité si faible que l'on n'avait pas cru devoir interdire l'emploi des lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers travaillaient dans leur chantier avec des lampes à feu nu, une petite quantité de grisou s'enflamma sur la lampe de l'un d'eux et les brûla légèrement.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier travaillait à l'avancement d'un niveau de la couche des Rochs. Ayant besoin d'un outil, il s'engagea avec une lampe à feu nu dans une remontée située à 10m du courant d'air, abandonnée et barricadée à la suite d'un accident de grisou. A peine avait-il fait quelques pas qu'une explosion eut lieu; il fut brûlé assez grièvement. La flamme atteignit la galerie de niveau et causa également des brûlures très graves à un rouleur.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

8. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
199	1860 24 Décembre	Puits Louise. — 15e Couche.	»	1 Brûlé grièvement.	292	104.590	?	Lampe à feu nu.	Cause fortuite.
200	1863 27 Août	Puits du Gabet	2 Brûlés	4 Brûlés grièvement.	486	156.171	Suspension momentanée du travail dans un chantier grisouteux situé à quelques mètres du courant d'air.	id.	Imprudence du gouverneur, qui faisait travailler des ouvriers avec des lampes à feu nu, dans le voisinage d'un chantier grisouteux.
201	id. 26 Décembre	Puits Lucy. — 15e Couche (la Vaure).	1 Brûlé.	»	id.	id.	Remonte de 20 à 25m de longueur, abandonnée depuis 36 heures.	id.	Imprudence de la victime, qui avait pénétré avec une lampe à feu nu dans une remonte abandonnée et barricadée.
202	1865 29 Novembre.	Puits Louise. — 15e Couche.	»	1 Brûlé assez grièvement.	512	175.332	Petite cloche formée à la suite d'un léger éboulement.	id.	Imprudence de la victime, qui avait pénétré dans son chantier avant la visite du gouverneur.

2. – GROUPE DE LA LOIRE.

1. – Département de la Loire.

de la Chazotte (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier, en entrant dans son chantier, mit le feu à une petite quantité de grisou; il fut brûlé assez grièvement. L'explosion fut très faible et la flamme ne se propagea pas.

Remarques particulières. — Le gouverneur avait visité le chantier une heure et demie avant l'arrivée des ouvriers ; aucune trace de grisou n'y avait été remarquée.

Circonstances de l'accident. — Trois ouvriers arrivaient dans un chantier grisouteux du puits du Gabet, chantier qui était situé à quelques mètres du courant d'air ; ils étaient munis de lampes de sûreté, et, avant de se mettre au travail, ils chassaient le gaz en agitant leurs vêtements.

Le gouverneur, voyant ces ouvriers chasser le grisou, emmenait deux autres ouvriers qui travaillaient avec des lampes à feu nu dans la galerie de retour d'air, près de l'entrée du premier chantier, lorsque deux explosions successives se produisirent. L'un des deux ouvriers était resté en arrière et sa lampe *à feu nu avait déterminé* l'inflammation du mélange grisouteux chassé du chantier. Le gouverneur et les 5 ouvriers furent brûlés plus ou moins grièvement ; deux d'entre eux moururent des suites de leurs brûlures.

Indications générales. — La 15e couche du puits Lucy donnait du gaz en très faible quantité. Le travail ordinaire se faisait avec des lampes à feu nu, après une visite préalable du gouverneur avec une lampe de sûreté ; des lampes à treillis étaient d'ailleurs mises à la disposition des ouvriers.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers étaient occupés à la consolidation d'un chantier ; l'un d'eux, ayant besoin d'un pic pour préparer la place d'un cadre et sachant que son ancien chantier renfermait des outils, se dirigea de ce côté muni de sa lampe à feu nu. A peine avait-il fait quelques pas dans ce chantier disposé en remonte, qu'une explosion eut lieu et le brûla mortellement ; l'autre ouvrier, resté à son travail, fut projeté à quelques pas par la force du coup de vent résultant de l'*explosion*, mais il n'eut aucun mal.

Remarques particulières. — L'ouvrier victime de l'accident a dû franchir la barrière qui barricadait l'entrée du chantier abandonné ; il n'avait pas songé que depuis 36 heures, le gaz avait eu le temps de s'y accumuler en assez grande quantité pour provoquer une explosion, et qu'il était de toute prudence de se munir d'une lampe de sûreté.

Indications générales. — Le grisou n'existait dans la 15e couche du puits Louise qu'en très faible *quantité*. Le travail ordinaire se faisait avec des lampes à feu nu, après que le gouverneur avait visité les chantiers.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier, sans attendre la visite du gouverneur, se rendait à son travail dans un chantier en remonte, de 7 à 8 mètres, situé à peu de distance du courant d'air. En élevant sa lampe à feu nu pour examiner l'effet produit par un petit éboulement, il détermina une faible explosion de grisou qui le brûla assez grièvement.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

8. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
203	1866 27 Juin	Puits Lucy. — 15e couche (banc supérieur).	»	2 Brûlés légèrement.	803	149.798	Galerie en cul-de-sac.	Lampe à feu nu.	»
204	id. 20 Octobre	Puits Jules.	»	1 Brûlé légèrement.	id.	id.	»	Lampe de sûreté dont le treillis était en mauvais état.	»
205	id. 24 Octobre	Puits Lucy.	»	1 Brûlé.	id.	id.	Remontée en cul-de-sac.	Lampe à feu nu.	Imprudence de la victime, qui avait pénétré avec une lampe à feu nu dans une remontée en cul-de-sac, sans avoir prévenu le gouverneur.
206	1867 13 Mars	Puits Baby. — 15e couche (la Vaure) (banc supérieur).	»	2 Brûlés grièvement.	617	176.936	Chantier en remonte et en cul-de-sac.	Lampe de sûreté mal fermée.	Négligence de l'une des victimes, qui ne s'était pas assurée que sa lampe de sûreté était vissée à fond. Négligence du lampiste qui avait remis à la victime une lampe mal fermée.

… – GROUPE DE LA LOIRE.

… – Département de la Loire.

… la Chazotte (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — La 15e Couche du puits Lucy donnait du grisou en faible quantité. Le travail ordinaire se faisait avec des lampes à feu nu et, par mesure de précaution, le gouverneur visitait les chantiers avant le commencement de la journée.

Circonstances de l'accident. — Au commencement du 2e poste, deux ouvriers étaient occupés dans une galerie en cul-de-sac de 7 mètres de longueur ; l'un d'eux, en élevant sa lampe au toit, mit le feu à une petite quantité de grisou qui le brûla légèrement ainsi que son camarade.

Indications générales. — Le grisou existait en petite quantité. Depuis peu de temps, on n'employait que des lampes de sûreté.

Circonstances de l'accident. — On creusait une galerie à travers-bancs à partir du puits Jules pour atteindre la 15e couche. Une petite quantité de grisou s'enflamma sur une lampe de sûreté dont le treillis était en mauvais état et brûla légèrement l'ouvrier qui en était porteur.

L'explosion fut faible.

Circonstances de l'accident. — Quatre boiseurs devaient poser deux cadres dans une galerie bien aérée ; ils étaient munis de lampes à feu nu. Voyant que l'emplacement des cadres n'avait pas été terminé, ils se rendirent, sans prévenir le gouverneur, dans une remontée en cul-de-sac où ils avaient travaillé la veille avec des lampes à feu nu. L'un d'eux, en élevant sa lampe au toit pour examiner un cadre, détermina une légère explosion de grisou qui lui causa des brûlures mortelles.

Remarques particulières. — Un arrêté préfectoral du 29 septembre 1835, prescrivait l'emploi des lampes à feu nu dans les remontées en cul-de-sac, etc ; si cette mesure avait été rigoureusement observée, les ouvriers n'auraient pas dû travailler, porteurs de lampes à feu nu, dans la remontée où a eu lieu l'accident.

Indications générales. — L'aérage se faisait naturellement du puits Baby au puits Lucy. Le courant d'air principal était assez vif.

La 15e Couche du puits Baby était grisouteuse ; dans tous les chantiers en cul-de-sac on travaillait avec des lampes de sûreté.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers étaient occupés dans un chantier en remonte et en cul-de-sac, de 12m de longueur à partir du courant d'air. A la fin du poste, comme ils partaient, une petite quantité de grisou qui s'était accumulée pendant la durée de leur travail, prit feu sur la lampe de sûreté de l'un d'eux et le brûla grièvement. L'explosion resta localisée.

Remarques particulières. — La lampe, cause de l'accident, avait été remise à l'ouvrier non … au fond. Ce dernier aurait dû s'assurer de l'état de sa lampe en la recevant.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

8. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	Causes indirectes. 10
						Tonnes			
207	1870 17 Février	Puits Jules.	»	1. Brûlé légèrement.	765	256.574	»	Lampe de sûreté ouverte.	Imprudence de la victime, qui avait enlevé le treillis de sa lampe.
208	id. 14 Mai	Puits Lucy.	1 Brûlé.	1 Brûlé légèrement.	id.	id.	Mauvaise distribution de l'aérage, ou dégagement accidentel de gaz, consécutif à un léger éboulement.	id.	Imprudence de l'une des victimes, qui avait détamisé sa lampe.
209	id. 14 Juillet	id. — Couche de la Vaure.	3 Brûlés.	»	id.	id.	Cloche produite par un éboulement au toit d'une descente en dépilage.	Lampe à feu nu.	Imprudence du gouverneur, l'une des victimes, qui visitait une cloche d'éboulement avec une lampe à feu nu.
210	id. 28 Novembre	id.	»	2 Brûlés légèrement.	id.	id.	Éboulement survenu au toit d'une remontée, traversée cependant par le courant d'air.	id.	Imprudence du sous-gouverneur, l'une des victimes, qui employait une lampe à feu nu dans une galerie en réparation, bien que l'emploi en fût défendu.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de la Chazotte (suite).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — On trouvait dans les travaux du puits Jules une quantité de grisou un peu plus forte qu'au puits Louise.

On employait des lampes de sûreté.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier mit le feu, avec sa lampe de sûreté dont il avait retiré le *treillis*, à une petite quantité de grisou qui le brûla légèrement.

Indications générales. — L'aérage général de la mine laissait à désirer. Les galeries par lesquelles l'air arrivait dans les travaux, étaient en mauvais état et n'avaient en plusieurs points que de faibles sections; de plus les portes d'aérage laissaient passer une assez grande quantité d'air.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers travaillaient au bas d'une descente à adoucir le coude que faisait cette descente avec un niveau en percement; ces deux galeries n'étaient aérées que par *diffusion*. L'un des ouvriers avait détamisé sa lampe de sûreté et l'avait accrochée au boisage.

Un petit éboulement se produisit au toit de la galerie et fut suivi d'une explosion de grisou qui brûla mortellement l'un des ouvriers et causa à l'autre des brûlures légères.

Remarques particulières. — L'éboulement avait rabattu sur la flamme de la lampe une petite quantité de gaz logée entre les cadres ou dégagée au moment même.

Indications générales. — Le courant d'air était bon et sa marche convenablement réglée.

Circonstances de l'accident. — Dans la couche de la Vaure, on dépilait une descente en enlevant au toit une planche de 1^m à 1^m 50 de charbon, laissée lors du traçage. Le boiseur qui faisait la visite du chantier avant l'arrivée des ouvriers ayant vu qu'un éboulement important s'était produit dans cette galerie, en avertit le gouverneur qu'il trouva près du puits avec une lampe à feu nu. Celui-ci, oubliant de changer sa lampe, se rendit dans la descente, monta sur l'éboulement et, en élevant sa lampe, détermina une explosion de grisou qui le brûla mortellement ainsi que les deux piqueurs qui venaient d'arriver au chantier.

Remarques particulières. — Le grisou n'avait pas été aperçu dans la descente avant l'éboulement; les ouvriers y employaient cependant des lampes de sûreté.

Indications générales. — Depuis le commencement de l'année, l'emploi des lampes Davy avait été généralisé dans tous les chantiers en avancement et en cul-de-sac.

Circonstances de l'accident. — Un éboulement s'était produit dans une remontée où passait le courant d'air. Le sous-gouverneur conduisait 4 ouvriers dans cette remontée afin de réparer le boisage démoli par l'éboulement; tous les ouvriers étaient munis de lampes de sûreté; le sous-gouverneur portait une lampe à feu nu, bien que l'emploi en fût défendu dans les galeries en réparation. En élevant sa lampe au toit, pour montrer aux ouvriers le travail qu'ils avaient à faire, le sous-gouverneur enflamma une petite quantité de grisou et fut brûlé légèrement ainsi que l'un des ouvriers.

A. — MINES DE HOUILL

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIEN

9. — Concess

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
211	1873 23 Février	Puits Charles.	1 Brûlé.	»	741	263.200	Remontée en percement, de 25m de longueur, située à 30m du courant d'air.	Lampe à feu nu.	Imprudence de la victime, qui avait pénétré, av sa lampe à f nu, dans une gal rie abandonnée barrée.
212	1875 22 Octobre	Puits Marie. — Couche quatorzième.	4 Brûlés.	1 Brûlé grièvement.	242	77.898	Arrivée du grisou à l'avancement d'une galerie supérieure par une remontée attaquée en descente et ayant percé dans un cul-de-sac grisouteux.	Amadou allumé, sur lequel on soufflait avant de mettre le feu à un coup de mine.	Imprudence de deux chefs poste qui tirai des coups de mi malgré la p sence du gris

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de la [illegible]ette (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'aérage des travaux se faisait naturellement; il était suffisant, eu égard à leur peu de développement.

Circonstances de l'accident. — Une cheminée en percement à l'extrémité d'un niveau, à 30^{m} du courant d'air, avait été provisoirement abandonnée à 25^{m} de longueur. Le gouverneur y ayant constaté la présence du grisou, l'avait barrée avec deux écoins en croix. Trois jours après, un ouvrier, en cherchant un outil qu'il avait égaré, y pénétra avec sa lampe à feu nu et détermina une petite explosion qui lui causa des brûlures mortelles.

Remarques particulières. — La remontée, bien que située à 30^{m} du courant d'air, n'était aérée que par diffusion. Le barrage de la cheminée au moyen de deux écoins en croix a été considéré comme insuffisant. La circulaire ministérielle du 6 décembre 1872 prescrivait un obstacle matériel rendant réellement impossible l'accès des galeries dangereuses abandonnées.

Indications générales. — L'air arrivait du puits Marie par la grande galerie horizontale qui reliait ce puits au puits Lucy, suivait la galerie supérieure, descendait la dernière remontée et revenait par la galerie inférieure à la grande galerie qu'il suivait jusqu'au puits Lucy.

Deux galeries conjuguées étaient poussées en demi direction dans la couche quatorzième, à partir de la grande galerie horizontale qui réunissait les puits Marie et Lucy. Ces galeries avaient 100^{m} de longueur environ, et la dernière remontée qui les réunissait se trouvait à 30^{m} des fronts de taille et avait 20^{m} de longueur; une nouvelle remontée était commencée à 25^{m} de la précédente.

Le grisou s'était montré plusieurs fois à l'avancement de la galerie inférieure et un ventilateur avait été établi dans le courant d'air pour aérer ce chantier.

Circonstances de l'accident. — Les ouvriers de la galerie inférieure qui perçaient la remontée, ayant reconnu la présence du grisou dans leur chantier, se rendirent dans la galerie supérieure pour achever le percement en descendant. Un havage ayant percé dans la partie supérieure de la remontée, le grisou se répandit dans la galerie supérieure en quantité assez grande pour éteindre les lampes à plusieurs reprises.

Malgré cela, un coup de mine fut préparé à l'avancement de la galerie supérieure ; un ouvrier alluma un morceau d'amadou dans la voie d'aérage et le remit à l'un des chefs de poste pour mettre le feu à la mèche ; mais au moment où ce dernier soufflait sur l'amadou pour en raviver le feu, une explosion se produisit. Cinq des ouvriers furent très gravement brûlés ; quatre d'entre eux moururent des suites de leurs brûlures. Le 6e ouvrier, qui roulait une benne dans la galerie inférieure, fut seulement jeté à terre et n'eut aucun mal.

Remarques particulières. — Deux ouvriers et un entrepreneur faisant fonctions de chef de poste étaient employés à l'avancement de chacune des galeries ; le charbon était très dur; ils l'abattaient à la poudre.

Ces chefs de poste n'étaient sous la direction d'aucun gouverneur ou sous-gouverneur; ils n'étaient commandés que par le Directeur qui visitait leur chantier une fois par semaine. Contrairement aux arrêtés préfectoraux du 29 septembre 1835 et du 5 septembre 1861, ils faisaient eux-mêmes la visite de leurs chantiers et allumaient leurs coups de mine.

De plus, le Directeur n'avait pas défendu d'une manière formelle le tirage à la poudre en présence du grisou.

A. — MINES DE HOUILLE

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE

8. — Concessio

Nos d'ordre. 1	DATE de l'acci-dent. 2	LIEU de l'acci-dent. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	de l'inflammation du gaz. 9	Causes indirectes. 10
						Tonnes			
213	1878 13 Mai	Puits Marie.	»	1 Brûlé légère-ment.	277	77.024	Surélévation du toit à l'entrée d'un niveau devant le-quel passait ce-pendant le cou-rant d'air.	Lampe Muëseler ouverte.	Imprudence du gouverneur, qui avait ouvert sa lampe de sûreté à l'entrée d'un ni-veau en perce-ment devant le-quel passait le courant d'air.

9. — Concession

(Instituée par décret

Nos d'ordre. 1	DATE de l'acci-dent. 2	LIEU de l'acci-dent. 3	Tués. 4	Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	de l'accumulation du gaz. 8	de l'inflammation du gaz. 9	Causes indirectes. 10
						Tonnes			
214	1849 7 Avril	Puits Saint-Martin.	»	1 Brûlé assez grièvement.	88	23.732	Suspension du travail dans une remontée pendant un jour de chô-mage.	Lampe à feu nu.	Imprudence de la victime, qui s'était introduit avec une lampe à feu nu dans une remontée,après un jour de chômage. Négligence du gouverneur, qui n'avait pas fait la visite régle-mentaire.
215	1853 2 Janvier	Puits Sainte-Anne.	»	1 Brûlé légère-ment.	103	30.986	Disposition en cul-de-sac d'une galerie légère-ment montante.	id.	Négligence de l'entrepreneur qui, malgré les ordres reçus, n'a-vait pas donné de lampes de sûreté aux ouvriers.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

de la Chazotte (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'aérage était peu actif. Une porte forçait l'air entrant par la galerie d'Ouzon à descendre une galerie sinueuse, en grande partie comprise dans les remblais, pour aller passer devant l'unique chantier en activité. Mais cette porte était souvent ouverte pour les besoins du roulage, et une partie de l'air se rendait directement au puits Marie.

Le *grisou* ne se montrait que rarement et en faible quantité dans les travaux.

Circonstances de l'accident. — Un gouverneur se trouvait avec son fils à l'entrée d'un niveau en percement devant lequel passait le courant d'air. Voulant rallumer la lampe de son fils, il ouvrit sa lampe Muëseler et détermina l'explosion d'une petite quantité de grisou, logée dans une surélévation du toit, qui le brûla légèrement. Son fils, qui se trouvait dans le niveau à 5 ou 6^m de lui, ne fut pas atteint.

Remarques particulières. — Le chantier où l'accident s'est produit n'était aéré que par diffusion sur 18^m de longueur.

du Montcel.

du 13 Juillet 1825).

Indications générales. — Le gouverneur avait le devoir de visiter les chantiers tous les jours avant l'arrivée des ouvriers.

Circonstances de l'accident. — On exploitait une couche divisée en deux parties par un banc de rocher de 2^m; un ouvrier était occupé au dépilage de la tranche inférieure, dans un chantier aéré seulement par diffusion ; il travaillait muni d'une lampe à feu nu. Etant allé dans une galerie montante de la tranche supérieure dans l'espoir d'y trouver du charbon éboulé qu'il pourrait joindre au sien, il détermina l'inflammation du grisou qui s'y était accumulé pendant un jour de chômage et fut brûlé assez gravement.

Remarques particulières. — Le matin de l'accident, le gouverneur n'avait pas fait la visite réglementaire.

Indications générales. — On travaillait à une galerie partant du puits Sainte-Anne et dirigée sur le puits du Pré-Soleil, dont elle devait améliorer l'aérage.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier était occupé à remplir une benne lorsque le grisou prit subitement feu à sa lampe et lui fit des brûlures sans gravité.

Remarques particulières. — Depuis quelques jours, on avait remarqué dans la galerie du puits Sainte-Anne, qui allait légèrement en montant, la présence d'une faible quantité de grisou ; la longueur de la galerie n'était encore que de quelques mètres. Le 31 décembre, le Directeur des travaux s'était aperçu que le grisou était plus abondant ; il s'était empressé de faire préparer des lampes de sûreté et avait recommandé à l'entrepreneur d'aller les prendre pour les donner aux ouvriers ; mais celui-ci avait négligé de le faire.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

2. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
216	1854 6 Février	Puits du Pré-Soleil. — Couche de la Vaure. — Banc supérieur.	1 Brûlé.	2 Brûlés légèrement.	98	40.215	Remonte en cul-de-sac, abandonnée depuis plusieurs jours.	Lampe à feu nu.	Imprudence de l'une des victimes, qui avait pénétré avec sa lampe à feu nu dans une remonte abandonnée et barrée.
217	1855 23 Août	id. — id. — id.	»	1 Brûlé légèrement.	160	45.095	Cloche produite par un léger éboulement au toit d'un chantier.	id.	Imprudence de la victime, qui avait élevé sa lampe dans une cloche au toit de son chantier.
218	1857 14 Octobre	Puits Sainte-Anne.	»	1 Brûlé légèrement.	222	72.700	Suspension de travail, pendant un chômage de 20 minutes, dans un chantier d'ailleurs convenablement aéré.	id.	»

. — GROUPE DE LA LOIRE.

— Département de la Loire.

a Montcel (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'aérage ne se faisait que par diffusion. Le puits du Pré Soleil exploitait les couches dites de la Vaure, à 156^{m} de profondeur. Les deux couches étaient séparées par un entre-deux de 1 à 3 mètres.

La couche supérieure seule dégageait du grisou en très faible quantité. Au sommet d'une galerie inclinée deux niveaux en préparation étaient poussés vers le puits Saint-Anne. L'avancement de la remonte, qui se prolongeait d'une douzaine de mètres au-dessus des niveaux, avait été suspendu depuis quelques jours et on l'avait barrée.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier se dirigeait avec sa lampe à feu nu vers le sommet de la remonte, au-dessus des niveaux ; il y était à peine depuis quelques instants, lorsque le gaz venant à s'enflammer le brûla, ainsi que deux de ses camarades qui se trouvaient dans la descente à 2^{m} du niveau. Le premier seul a succombé aux suites de ses brûlures.

Remarques particulières. — Pour pouvoir mettre le feu au grisou, l'ouvrier qui a causé l'accident a dû s'avancer de 7 à 8^{m} dans la galerie en cul-de-sac et franchir les écoins en bois qui défendaient l'entrée de la partie dangereuse

L'emploi des lampes de sûreté aurait dû être exclusif dans cette région, jusqu'à ce que la galerie où a eu lieu l'accident eût été mise en communication avec le puits voisin. De plus, on aurait dû boucher et interdire l'accès de la partie dangereuse, qui était abandonnée depuis 8 jours, de manière à ce que personne ne pût y pénétrer.

Indications générales. — L'aérage général était satisfaisant. Le grisou se montrait en très faible quantité dans les travaux du puits du Pré-Soleil et l'on y employait des lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident. — Un piqueur travaillait à l'avancement d'une galerie tracée dans le banc supérieur de la couche de la Vaure. Il quitta son chantier pour aller dîner en compagnie de ses camarades qui travaillaient dans une galerie voisine. Pendant son absence un faible éboulement se produisit; lorsqu'il revint, voyant une petite quantité de charbon éboulé du toit de sa galerie et pour se rendre compte des causes de l'éboulement, il éleva sa lampe à feu nu jusqu'au faîte de la galerie. Au même instant une détonation se fit entendre et le brûla légèrement ; un de ses camarades qui se trouvait près de lui n'eut aucun mal.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Il a été recommandé au gouverneur d'avoir toujours, dans cette partie des travaux, des lampes de sûreté toutes prêtes afin que, en pareille circonstance, l'ouvrier pût constater la présence du gaz et se prémunir contre tout accident.

Indications générales. — L'éclairage, dans les travaux du puits Sainte-Anne, se faisait avec des lampes à feu nu. Mais, comme parfois des traces légères de grisou se manifestaient, le gouverneur visitait chaque matin les chantiers, avec une lampe de sûreté, avant l'arrivée des ouvriers.

Circonstances de l'accident. — Un piqueur, travaillant dans un chantier d'avancement, s'était absenté pendant 20 minutes pour aller chercher des outils ; quelques minutes après son retour, une légère quantité de gaz s'enflamma sur sa lampe à feu nu et lui fit des brûlures sans gravité.

Remarques particulières. — L'aérage du chantier où a eu lieu l'accident était satisfaisant et se faisait au moyen d'un ventilateur et de conduites en bois aboutissant à 1^{m} 50 du front de taille.

Mesures prises à la suite de l'accident. — L'emploi exclusif des lampes de sûreté a été prescrit jusqu'à l'achèvement du traçage dans cette partie de la mine.

A. — MINES DE HOUILLI

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENN

9. — Concessi

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
(*) 219	1863 27 Février	Puits Sainte-Anne. — 15e couche dite la Vaure	»	1 Brûlé assez grièvement.	?	64.375	»	Lampe à feu nu.	Imprudence · la victime, qui vait élevé sa la pe à feu nu au t d'une galerie.
220	id. 7 Novembre	id.	»	1 Brûlé légèrement.	id.	id.	Petite remontée située à 6m du courant d'air.	id.	»
221	1865 17 Juillet	Puits Lacroix. — 14e couche, dite des Roches.	1 Brûlé.	3 Brûlés dont 1 légèrement.	?	87.330	Niveau en percement aéré au moyen d'une colonne de tuyaux.	Lampe de sûreté détamisée à la suite d'un choc.	Imprudence l'une des victi qui avait pl sa lampe, fermée à clef, des roues d' benne, dont choc avait d rioré le pas vis du treillis
222	1868 19 Mai	Puits Saint-Martin. — Couche de la Vaure. —	3 dont 1 Brûlé et Asphyxié.	1 Brûlé.	284	91.770	Aérage insuffisant et vicieux, avec marche descendante du courant, dans un chantier où le dégagement du gri-	? Lampe Davy dont le tamis aurait rougi.	? Impru d'une des mes qui laissé rou treillis d

(*) Accident porté par erreur à la Concession de Beaubrun (No 150), dans le fascicule précédent.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

du Montcel (suite).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — Le grisou ne se montrait qu'irrégulièrement et en petite quantité dans la 15e couche. Le travail ordinaire se faisait avec des lampes à feu nu dans les chantiers où la présence du gaz n'avait pas été constatée dans la visite du gouverneur.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier était occupé à boiser un chantier d'avancement. Au moment où il élevait sa lampe à feu nu, au toit, contre le front de taille, une petite quantité de grisou s'enflamma et le brûla assez grièvement. Deux autres ouvriers qui travaillaient à côté de lui ne furent pas atteints.

L'explosion fut faible et locale.

Remarques particulières. — Le gouverneur faisait une visite quotidienne dans les chantiers avant le commencement du travail. Le jour de l'accident, il n'avait pas constaté la présence du grisou.

Indications générales. — Le grisou apparaissait au puits Sainte-Anne, mais en si faible quantité qu'on y travaillait avec des lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers étaient occupés dans une petite remontée située à 6 mètres du courant d'air ; une faible explosion de grisou s'étant produite, l'ouvrier le plus rapproché du front de taille fut légèrement brûlé ; l'autre, placé à 2m en arrière, ne fut pas atteint.

Remarques particulières. — Le gouverneur, en faisant sa tournée, n'avait reconnu, le jour de l'accident, aucune trace de grisou.

Indications générales. — L'air entrait par le puits Lacroix dans la galerie en percement; un ventilateur placé à l'extrémité de la galerie le renvoyait dans une colonne de tuyaux arrivant à 1m du front de taille, suivant la galerie et le puits et débouchant sous le massif des chaudières.

La couche était grisouteuse. Le travail se faisait avec des lampes de sûreté.

Circonstances de l'accident. — Trois ouvriers travaillaient, sous la surveillance d'un gouverneur, au percement d'une galerie partant du puits Lacroix et poussée dans la couche des Roches (14e couche). Une des lampes non fermées à clef avait été posée à terre près d'une benne ; elle se trouva probablement engagée sous l'une des roues par suite d'un mouvement imprimé à la benne, car, au moment où un ouvrier voulut la déplacer, le treillis se détacha. Il s'ensuivit une explosion qui brûla grièvement les trois ouvriers et légèrement le gouverneur ; l'un d'eux mourut des suites de ses brûlures.

Explosion locale assez faible.

Remarques particulières. — Le réservoir de la lampe, cause de l'accident, a été retrouvé sous l'une des roues de la benne ; le pas de vis était détérioré.

Indications générales. — La couche de la Vaure comprenait 2 bancs et avait une puissance totale de 7m. Elle dégageait du grisou. L'aérage général était satisfaisant, mais la ventilation du chantier, où s'est produit l'accident, n'était obtenue que par diffusion et avec une marche descendante du courant, depuis le percement d'une remonte qui abrégeait le parcours de l'air. Ce chantier était situé à l'extrémité Sud-Ouest des travaux et dans le voisinage d'une faille. Le grisou se dégageait en assez grande abondance pour que sa présence y fut sensible à la lampe au toit des galeries.

A. — MINES DE HOUILLE

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

9. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'acci-dent. 2	LIEU de l'acci-dent. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
		Niveau du 204m.					sou était favorisé par le voisinage d'une faille.		lampe de sûreté et qui l'aurait maniée ensuite sans précaution.

10. — Concession

(Instituée par décret

						Tonnes			
223	1830 Septembre.	Puits Mars. — 13e couche.	»	1 Brûlé grièvement.	138	36.900	»	Lampe à feu nu.	»
224	1832 2 Juillet	Puits de l'Etang.	3 Brûlés.	»	78	30.380	Chômage général de 36 heures.	id.	Imprudence des victimes, qui avaient pénétré dans leur chantier avec des lampes ordinaires, après un chômage de 36 heures.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de Montrond (suite).

OBSERVATIONS.

11

On employait simultanément dans cette mine les lampes à feu nu pour les galeries de roulage et les lampes de sûreté dans les chantiers suspects.

Circonstances de l'accident. — Une explosion, dont la cause immédiate n'a pu être établie d'une façon certaine, s'est produite dans un chantier placé en dehors du courant d'air, pendant que quatre ouvriers travaillaient au dépilage d'un petit massif de charbon, situé contre une faille limitant le champ d'exploitation du puits Saint-Martin. Les ouvriers qui s'étaient vus tout à coup entourés de flammes, avaient pris la fuite dans la direction du courant d'air; l'un d'eux, tombé en chemin, a été retrouvé mort; deux autres ont succombé quelques jours après des suites de leurs brûlures; enfin le quatrième a été grièvement brûlé.

La commotion de l'explosion a été ressentie à 200^m de distance. Une porte d'aérage ayant été détruite, l'air se rendait directement au puits de retour sans traverser la zone des dépilages; on a dû, pour effectuer le sauvetage, construire un barrage pour y diriger le courant.

Les flammes ne se sont propagées qu'à peu de distance; mais la production de fumées abondantes et d'acide carbonique a contribué avec le renversement de l'aérage à l'asphyxie de la première victime.

Remarques particulières. — L'examen des lampes des victimes après l'accident a fait reconnaître qu'elles étaient en bon état, sauf une, dont le tamis était légèrement oxydé et moins souple, comme s'il avait rougi.

On a remarqué sur quelques cadres, notamment sur ceux qui avoisinaient le chantier de dépilage, une certaine quantité de poussière charbonneuse facilement effaçable avec le doigt.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Le Directeur de la mine s'est engagé à remplacer par des lampes de sûreté, les lampes à feu nu qui étaient employées dans certains quartiers.

de Méons.

du 4 Novembre 1824).

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier travaillait dans son chantier, lorsqu'une petite quantité de grisou s'enflamma sur sa lampe à feu nu et le brûla grièvement.

Mesures prises à la suite de l'accident. — A la suite de cet accident, des lampes Davy ont été données aux ouvriers.

Circonstances de l'accident. — Trois ouvriers se rendaient à leur travail après un chômage de 36 heures. A peine étaient-ils dans leur chantier, qu'une certaine quantité de grisou s'enflamma sur leurs lampes à feu nu et les brûla tous les trois mortellement.

Remarques particulières. — Des lampes de sûreté étaient à la disposition des ouvriers. Il y a eu grande imprudence de la part des victimes de pénétrer dans leur chantier avec des lampes à feu nu, après un chômage aussi prolongé.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

10. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
225	1834 29 Mai	Puits du Pont de l'âne.	1 Brûlé.	1 Brûlé.	140	45.300	»	»	»
226	1835 24 Août	Puits Saint-Claude.	»	2 Brûlés.	144	46.420	»	Lampe à feu nu.	Négligence du gouverneur, qui n'avait pas visité les chantiers avant l'arrivée des ouvriers, ainsi qu'il devait le faire.
227	id. 31 Octobre	id.	5 Brûlés.	5 Brûlés.	id.	id.	»	»	»
228	1843 27 Avril	id.	»	1 Brûlé légèrement.	112	42.190	»	Lampe à feu nu.	Imprudence de la victime, qui avait pénétré dans son chantier avec une lampe à feu nu, malgré une défense formelle.
229	1858 10 Août	id.	»	1 Brûlé légèrement.	163	24.065	Interception momentanée du courant d'air.	Flamme d'un coup de mine.	»

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de Méons (*suite*).

OBSERVATIONS.
11
Circonstances de l'accident. — Pas de détails.
Indications générales. — Le grisou se montrait quelquefois dans les travaux du puits Saint-Claude, mais en très faible quantité. Le gouverneur visitait tous les jours les chantiers, muni d'une lampe de sûreté, et faisait détoner le gaz quand il y en avait. **Circonstances de l'accident.** — Deux ouvriers se rendaient à leur travail. Croyant que leur chantier avait été visité par le gouverneur, ils y pénétrèrent avec confiance; à peine y étaient-ils entrés qu'une petite quantité de grisou s'enflamma sur une lampe à feu nu et les brûla tous les deux. **Remarques particulières.** — Le jour de l'accident, le gouverneur n'avait pas fait sa visite quotidienne.
Circonstances de l'accident. — Pas de détails
Circonstances de l'accident. — Un ouvrier, pénétrant dans son chantier avec une lampe à feu nu, mit le feu à une petite quantité de grisou qui le brûla légèrement. **Remarques particulières.** — Il était interdit aux ouvriers d'entrer avec des lampes à feu nu dans le chantier où a eu lieu l'accident.
Indications générales. — L'aérage était naturel et en général satisfaisant. Par suite de l'envahissement par les eaux, de la galerie de communication entre les puits de l'Eparre et Saint-Claude et en raison des fortes chaleurs qui régnaient, le courant d'air avait été momentanément intercepté. **Circonstances de l'accident.** — Un ouvrier, après avoir préparé un coup de mine au toit d'une galerie y mit le feu. Le départ du coup occasionna une petite explosion de gaz qui le brûla très légèrement à la barbe et à l'épaule gauche. **Remarques particulières.** — Un arrêté du 14 mars 1858 prescrivait, pour le tirage à la poudre dans les mines grisouteuses, certaines précautions qui n'ont pas été prises dans cet accident. Mais la mine du puits Saint-Claude n'était plus considérée comme une mine à grisou, la présence de ce gaz n'y ayant pas été constatée une seule fois depuis plus de dix ans.

A. — MINES DE HOUILL

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIEN

10. — [illegible]

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
230	1862 23 Août	Puits Saint-Claude. — 13e couche.	3 Brûlés.	1 Brûlé légèrement.	?	?	Galerie de niveau de 16m de longueur, aérée seulement par diffusion et éboulée sur une longueur de 8m.	Lampe à feu nu.	Cause fortuite.
231	1868 11 Décembre	Puits Saint-Louis. — 11e couche.	»	1 Brûlé légèrement.	344	12[illegible].233	Chantier en remonte.	id.	Imprudence de la victime, qui avait pénétré dans son chantier avec une lampe à feu nu avant la visite du gouverneur.
232	1869 12 Août	id. — 12e couche.	2 Brûlés.	»	458	134.370	Remonte en cul-de-sac abandonnée depuis 2 jours, par suite d'une forte venue d'eau provenant d'un tranchant que l'on avait rencontré et qui dégageait en même temps du gaz.	id.	Négligence de la Direction, qui aurait dû défendre l'entrée de la remonte avant qu'elle n'eût été visitée.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

de Méons (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — La couche était peu gazeuse. Le grisou n'avait pas été signalé depuis 25 ans. On se servait de lampes ordinaires.

Circonstances de l'accident. — Une galerie de niveau partant d'un grand plan incliné avait atteint 16^{m} de longueur; on l'avait abandonnée pour ne pas approcher trop près de parties incendiées qu'on *supposait être à* 25^{m} de distance. Un éboulement s'était produit dans cette galerie sur une longueur de *8 mètres et* deux ouvriers étaient occupés à le relever. L'un d'eux, en montant sur les déblais, éleva sa lampe *à feu nu* pour examiner la partie supérieure de la galerie qui menaçait de s'ébouler de nouveau et détermina une explosion de gaz qui leur causa à tous deux des brûlures mortelles. Deux autres ouvriers, qui se trouvaient dans le plan incliné, furent également brûlés, l'un mortellement, l'autre légèrement.

L'explosion fut faible et toute locale.

Remarques particulières. — Le courant d'air passait dans le plan incliné, à l'extrémité de la galerie de niveau. Deux heures avant l'accident, le gouverneur avait visité la galerie et avait examiné le *toit sans reconnaître* la présence du grisou. Peut être le gaz provenait-il de la distillation de la houille dans des parties en feu distantes de 25^{m} seulement du lieu de l'accident ?

Indications générales. — La 11e couche était peu gazeuse; la 10e au contraire, qui était voisine, contenait du gaz en quantité notable. Le travail se faisait avec des lampes à feu nu, excepté aux avancements non aérés où l'on se servait de lampes de sûreté. Le gouverneur visitait les chantiers tous les matins avant l'arrivée des ouvriers.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier se rendait à son travail; au moment où il arrivait à son chantier, une petite quantité de grisou s'enflamma sur sa lampe et le brûla très légèrement.

Simple flambée de gaz.

Remarques particulières. — Le jour de l'accident la victime avait pénétré dans son chantier avant que la visite ne fût faite et avant l'arrivée de ses camarades.

Circonstances de l'accident. — Deux mineurs venaient avec des lampes à feu nu chercher des outils dans une remontée en cul-de-sac, longue de 26^{m}, qu'une forte venue d'eau les avait obligés à abandonner. Le grisou prit feu sur leurs lampes et leur fit à tous deux des brûlures mortelles.

Remarques particulières. — Les arrêtés préfectoraux des 14 février 1825, 29 septembre 1835 et 23 juillet 1836 prescrivaient : 1° une visite journalière et à la lampe de sûreté de tous les chantiers avant l'arrivée des ouvriers; 2° le maintien en état de bon aérage de tous les travaux momentanément abandonnés dont l'accès n'était pas défendu aux ouvriers; 3° l'emploi exclusif de la lampe de sûreté dans tous les chantiers en cul-de-sac.

On n'avait jamais rencontré de grisou dans cette partie de la mine. Cependant la venue d'eau au sommet de la remonte laissait dégager des gaz et quelques heures avant l'accident, un ouvrier, dépêché par le gouverneur pour voir si l'avancement de la remonte donnait toujours beaucoup de gas, n'avait pu dépasser le milieu de la remonte et avait dû rétrograder avec sa lampe éteinte. Connaissant cet état de choses, la Direction aurait dû défendre l'accès de cette remonte jusqu'à complète expulsion des gaz.

A. — MINES DE HOUILLE

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE

10. — Concessio

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
233	1872 21 Septembre	Puits Saint-Louis. — 11e couche.	»	3 Brûlés légèrement.	636	186.798	Niveau en cul de sac dont le front de taille était à 40m du courant d'air.	Lampe à feu nu.	Négligence et imprudence du sous-gouverneu qui n'avait pa fait la visite d chantier et qui malgré les crain tes des ouvriers les avait entraî nés près du fron de taille avec de lampes à feu nu.
234	1873 8 Mai	id. id.	»	1 Brûlé légèrement.	888	78.192	Poche produite par un éboulement au toit d'une remontée où passait le courant d'air.	id.	Imprudence d sous-gouverneu qui avait lais travailler à feu dans le voisina de points reco nus dangereux

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la L

de Méons (suite).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — Le courant d'air entrait par le puits des Flaches, suivait une succession de faux puits et de cheminées inclinées, où il se divisait en 4 branches correspondant aux quatre couches 9, 10, 11 et 12, exploitées par le puits Saint-Louis, et sortait finalement par ce dernier puits. La division était faite avec soin, mais le volume d'air total était faible ; aussi le lieu de l'accident n'était-il qu'imparfaitement aéré. Un puissant ventilateur dont l'installation était presque terminée sur le puits des Flaches devait améliorer l'aérage.

Les ouvriers étaient munis de lampes à feu nu. Le gouverneur devait visiter les chantiers chaque matin avant l'arrivée des ouvriers.

Circonstances de l'accident. — Trois ouvriers travaillaient depuis quelques jours à l'avancement d'un niveau de roulage de la 11e couche. Le 21 septembre, en descendant dans la mine, l'un des ouvriers, désigné pour aller travailler dans un autre chantier, alla chercher ses outils à 5m du front de taille et recommanda à ses deux camarades, qu'il rencontra à 40m en arrière, de se servir de lampes de sûreté, car la veille il avait éprouvé un mal de tête qu'il considérait comme un signe de prochain dégagement de gaz. Les deux ouvriers attendirent le sous-gouverneur auquel ils firent part de leur crainte ; ce dernier les entraîna néanmoins vers le front de taille où l'un des ouvriers, en élevant sa lampe vers l'un des derniers cadres, détermina l'inflammation d'une petite quantité de grisou. Les deux ouvriers et le sous-gouverneur furent brûlés légèrement; un rouleur, placé à 4m du front de taille, ne fut pas atteint.

Remarques particulières. — Bien que le chantier fut à 40m du courant d'air, le grisou ne s'y était jamais montré.

Le jour de l'accident, le gouverneur n'avait pas visité le chantier, ainsi qu'il était tenu de le faire, avant l'arrivée des ouvriers.

Indications générales. — La circulation de l'air bonne, dans l'ensemble, était peu active dans la région Est de la 11e couche ; le courant qu'on y conduisait, subissait de grandes pertes à travers des portes nombreuses, les remblais en pierres sèches et les vides des chantiers.

L'aérage eût pu être amélioré en activant la marche du ventilateur Guibal établi sur le puits d'entrée d'air; ce ventilateur faisait 45 tours par minute,et n'envoyait dans la mine que 17mq, d'air par seconde, à répartir entre 4 couches.

Circonstances de l'accident. — On surélevait, pour la transformer en plan incliné, la dernière remontée reliant deux niveaux de la région Est de la 11e couche. Le grisou s'était montré à l'avancement des deux niveaux et depuis 6 mois on y employait des lampes Muëseler. Le courant d'air passant dans la remontée, le sous-gouverneur n'avait pas donné de lampes de sûreté aux ouvriers qui y travaillaient. Un de ces ouvriers, en élevant sa lampe à feu nu dans une cloche produite au toit par un petit éboulement, fut légèrement brûlé par une petite flambée de grisou.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

10. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT: Causes directes de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT: Causes directes de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT: Causes directes. 10
						Tonnes			
235	1874 4 Juillet	Puits Saint-Louis. — 11e couche.	»	1 Brûlé légèrement.	726	104.462	Remontée en dépilage de 15m de longueur, aérée seulement par diffusion.	Lampe à feu nu.	»
236	1880 14 Septembre	Id. — 12e couche. — Galerie principale.	»	1 Brûlé légèrement.	681	92.319	Dégagement exceptionnel de grisou dans la 13e couche ou Arrêt du ventilateur pendant le changement de poste.	Id.	»

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1 — Département de la Loire.

de Méons (suite).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'air entrait par le puits Saint-Louis, aérait successivement les travaux des 11ᵉ, 10ᵉ et 9ᵉ couches et sortait par le puits des Flaches sur lequel était établi un fort ventilateur Guibal. L'aérage des travaux très étendus du puits Saint-Louis ne donnait lieu à aucune critique.

Circonstances de l'accident. — Trois ouvriers se rendaient à leur travail dans une remontée en dépilage de la 11ᵉ couche, dans la partie Sud-Est des travaux du puits Saint-Louis. Cette remontée partait d'un niveau dans lequel passait le courant d'air et avait 15^m de longueur.

L'un des ouvriers était arrivé près du front de taille et posait sa lampe à feu nu à terre, lorsqu'une petite explosion de grisou se produisit. Il fut brûlé légèrement ; les deux ouvriers qui le suivaient de près ne furent pas atteints.

Remarques particulières. — Le grisou ne s'était pas montré dans la partie Sud-Est de la 11ᵉ couche pendant la période de traçage ; pendant le dépilage, on ne l'avait rencontré, et encore en très petite quantité, qu'à l'avancement du niveau percé dans une partie bouleversée de la couche et en dehors du courant d'air ; on n'employait des lampes de sûreté que dans ce niveau.

Le courant était très suffisant au pied de la remontée où l'explosion s'est produite.

La visite de cette remontée avait été faite par le sous-gouverneur deux heures avant l'accident.

Mesures prises à la suite de l'accident. — A la suite de cet accident, le quatrième arrivé depuis 1869 dans la même région de la 11ᵉ couche, la Direction de la mine a prescrit l'emploi des lampes de sûreté dans tous les travaux de cette couche situés au Sud-Est du puits Saint-Louis.

Indications générales. — L'aérage général était satisfaisant.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers étaient assis dans une lampisterie à 130^m du puits d'entrée de l'air et à 50^m au-delà du point où l'air des travaux de la 13ᵉ couche qui était grisouteuse rejoignait le courant d'air principal. L'un d'eux, qui venait de placer sa lampe ouverte sur un rayon élevé de $0^m,80$ au-dessus du sol, se vit tout-à-coup entouré d'une flamme bleuâtre; il appela à son secours son camarade qui se jeta la face contre terre et lui cria d'en faire autant. Lorsqu'ils se relevèrent les lampes étaient éteintes et le premier se plaignit de brûlures sur les parties libres du corps. Des rouleurs qui se trouvaient à quelque distance ressentirent une violente poussée d'air, qui projeta même l'un d'eux sur la benne qu'il conduisait.

Remarques particulières. — La lampisterie occupait un emplacement défectueux ; la Direction aurait dû la faire installer plus près du puits d'entrée de l'air, ou tout au moins en amont du point où l'air des travaux de la 13ᵉ couche rejoint le courant d'air.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Des instructions ont été immédiatement adressées aux exploitants pour les inviter à placer la station de rallumage en un lieu plus sûr.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

11. — Concession de

(Instituée par décret

Nº d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
237	1860 12 Mai	Puits Saint-Claude.	»	2 Brûlés.	163	34.027	Arrêt du ventilateur, pendant une heure environ, au moment du déjeuner.	Lampe à feu nu.	Imprudence de l'une des victimes, qui avait pénétré dans son chantier avec une lampe à feu nu, malgré la défense du gouverneur.
238	1869 8 Juin	Id.	»	1 Brûlé assez grièvement.	205	26.333	Suspension du travail pendant une heure dans une galerie de recherche en cul de sac, aérée normalement au moyen d'un ventilateur.	Id.	Négligence de l'entrepreneur, qui n'avait pas visité le chantier avant d'y placer les ouvriers.
239	1873 29 Avril	Id.	»	1 Brûlé assez grièvement.	?	?	Vide produit par un petit éboulement dans la paroi d'une galerie de roulage où passait cependant le courant d'air.	Id.	»

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a — Département de la Loire.

Combérigol (ou Combe-Rigole).

du 3 Octobre 1856,.

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'aérage se faisait au moyen d'un ventilateur.

Le travail ordinaire aux avancements et dans les chantiers se faisait avec des lampes de sûreté ; dans les galeries on se servait de lampes à feu nu. Il était défendu aux ouvriers qui travaillaient dans les chantiers d'y aller avec des lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier avait fini son repas; il voulut pénétrer dans son chantier avant que la ventilation, interrompue pendant l'heure des repas fût rétablie. A peine y était-il qu'une petite quantité de grisou s'enflamma sur sa lampe à feu nu et le brûla, ainsi qu'un de ses camarades qui l'avait suivi. L'explosion fut très faible.

Remarques paticulières. — Le chantier, où a eu lieu l'accident, était situé à la partie inférieure des travaux ; la ventilation en était insuffisante ; il devait déboucher très prochainement dans une galerie en percement en sens inverse, destinée à améliorer l'aérage.

Indications générales. — On exécutait à l'entreprise un travail de recherche du côté de la limite Est de la concession.

Le grisou était peu abondant ; on se servait de lampes à feu nu à l'avancement, mais seulement après visite préalable faite avec une lampe de sûreté après chaque interruption de travail.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers et un entrepreneur se rendaient à leur travail dans un chantier que le poste précédent avait quitté depuis une heure. Ce chantier était à l'extrémité d'une galerie de recherches dont le front de taille était à 90^{m} du courant d'air et dont les 20 derniers mètres se trouvaient dans la couche. L'un des ouvriers précédait les autres d'une vingtaine de mètres et portait une lampe à feu nu ; arrivé à 2^{m} du front de taille, il occasionna une légère explosion de gaz qui le brûla assez grièvement.

Remarques particulières. — Le chantier où a eu lieu l'accident était aéré au moyen d'un ventilateur placé dans le courant d'air et de caisses arrivant à 4^{m} du front de taille.

L'entrepreneur était tenu de visiter les chantiers après chaque interruption de travail; cette visite n'avait pas été faite le jour de l'accident.

Indications générales. — Un volume d'air assez abondant arrivait de la concession du Plat de Gier dans le quartier où l'accident s'est produit; mais les rouleurs laissaient souvent ouverte une porte d'aérage et le courant d'air n'était pas toujours très vif dans la galerie de roulage.

Dans les chantiers en cul-de-sac, on employait des lampes Mueseler, et dans les galeries d'aréage, des lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers muni de lampes à feu nu boisaient un vide qu'un petit éboulement de charbon avait produit dans la paroi d'une galerie de roulage où passait le courant d'air. Au moment où l'un d'eux élevait sa lampe, une faible détonation eut lieu ; cet ouvrier fut brûlé assez grièvement ; son camarade, au contraire, resté sur le sol de la galerie ne fut pas atteint.

Remarques particulières. — Le grisou ne s'était jamais montré dans la région de l'accident.

A. — MINES DE HOUILL

1. — BASSIN DE SAINT-ETIE

11. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
240	1877 19 Avril	Puits Saint-Claude.	»	1 Brûlé assez grièvement.	179	33.083	Chûte d'un peu de charbon dans une galerie où passait cependant l'une des branches du courant d'air.	Lampe à feu nu.	»

12. — Concession

(Instituée par décret

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	Tués. 4	Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	de l'accumulation du gaz. 8	de l'inflammation du gaz. 9	Causes indirectes. 10
						Tonnes.			
241	1842 13 Août	Puits Gagne-Petit. — 3me couche.	»	2 Brûlés.	203	73.097	Suspension du travail dans un chantier suspect.	Lampe à feu nu.	Imprudence l'une des victim qui avait pén dans son chant avec une lamp feu nu, malgr défense qui avait été faite.
242	1848 20 Septembre	Puits Bertrand.	1 Brûlé.	2 Brûlés grièvement.	403	124.310	Remontée en cul de sac, aérée à l'aide d'un ventilateur.	id.	Imprudence l'une des victi qui avait ouvert sa lampe à fe près de l'e d'une ... grisouteuse l'on était ...

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

Comberigol (ou Combe-Rigole) (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Mesures prises à la suite de l'accident. — La Direction a prescrit l'emploi exclusif des lampes Muëseler.

Indications générales. — Le grisou ne se montrait dans la mine que dans les chantiers mal aérés, les chargeurs n'étaient munis de lampes de sûreté que lorsque la présence du grisou avait été reconnue dans les chantiers où ils devaient pénétrer.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier travaillait dans un niveau où passait l'une des branches du courant d'air; il élevait la galerie en abattant au toit une tranche de charbon de 0m 60 d'épaisseur. Cet ouvrier était muni d'une lampe Muëseler, mais son chargeur avait une lampe à feu nu. En plaçant un écoin, il fit tomber, un peu de charbon; cette chûte occasionna un petit dégagement de grisou qui s'enflamma à la lampe à feu nu que le chargeur avait accrochée à un cadre, à 1m 50 en arrière. Le piqueur fut brûlé assez grièvement, tandis que le chargeur qui se trouvait à 3m 50 de lui, vit la flamme mais ne fut pas atteint.

Mesures prises à la suite de l'accident. — A la suite de cet accident, les exploitants ont supprimé l'emploi des lampes à feu nu dans les travaux.

de Terrenoire.

du 30 Mars 1784).

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier se rendait à son travail; en pénétrant dans son chantier, une petite quantité de grisou s'enflamma sur sa lampe à feu nu et le brûla ainsi qu'un de ses camarades.

Remarques particulières. — Il était expressément défendu aux ouvriers d'entrer dans le chantier où a eu lieu l'accident, sans être munis de lampes de sûreté.

Indications générales. — L'aérage général était très satisfaisant; l'air entrait par le puits d'Aveize et sortait par le puits Bertrand.

Dans les remontées du puits Bertrand le gaz s'accumulait en assez grande quantité, et bien que les galeries de roulage fussent bien aérées, on était obligé de se servir de ventilateurs à bras pour chasser le grisou des remontées. Les ouvriers travaillant dans les chantiers étaient munis de lampes de sûreté; les autres, travaillant galeries de dans les roulage, avaient des lampes à feu nu. Le charbon glissait par son poids jusqu'aux galeries de roulage, et les rouleurs ne pénétraient pas dans les chantiers.

Circonstances de l'accident — Un piqueur, avant d'entrer dans son chantier, se déshabillait

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

12. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			de purger avec un ventilateur à bras
243	1848 26 Décembre	Puits neuf du Gagne Petit. — 5me couche.	»	2 Brûlés.	405	124.310	Suspension du travail pendant l'intervalle de deux postes.	Lampe à feu nu.	Imprudence de l'une des victimes, qui avait pénétré dans son chantier avec une lampe à feu nu, malgré la défense qui en était faite.
244	1851 26 Mars	Puits d'Avaize — Couche du Bonmenu.	11 Brûlés et asphyxiés.	4 Brûlés.	218	60.180	Mauvaise distribution de l'aérage Dégagement abondant de grisou, signalé depuis plusieurs jours par les ouvriers. Temps très orageux (?)	?	?

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

de Terrenoire (suite).

OBSERVATIONS.

11

à l'entrée d'une remontée; pendant ce temps un enfant tournait le ventilateur pour chasser le grisou qui s'était accumulé dans cette galerie. Au même instant arrivait un chargeur qui devait prendre le charbon de ce chantier; 5 mètres environ avant d'arriver au bas de la remontée, le chargeur accrocha sa lampe à feu nu aux parois de la galerie. Le grisou, chassé par le ventilateur dans le chemin de roulage et poussé par le courant d'air dans la direction de la lampe, s'enflamma et brûla grièvement les trois ouvriers; l'un d'eux (le jeune enfant) mourut des suites de ses brûlures.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Tous les ouvriers sans exception ont été munis de lampes de sûreté.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier se rendait à son travail à peine avait-il pénétré dans son chantier qu'une petite quantité de grisou s'enflamma sur la lampe à feu nu qu'il portait et le brûla, ainsi qu'un de ses camarades qui se trouvait à peu de distance.

Remarques particulières. — Il était formellement interdit aux ouvriers de pénétrer avec des lampes à feu nu dans le chantier où a eu lieu l'accident.

Indications générales. — L'aérage se faisait naturellement entre les puits d'Avaize et Bertrand. Le volume d'air était suffisant; mais le courant d'air, mal dirigé, pouvait suivre plusieurs directions et ses diverses branches pouvaient se contrarier.

La couche du Bon-Menu était depuis longtemps reconnue dangereuse; on y employait des lampes de sûreté. Les travaux consistaient en un travers-bancs suivi d'un plan incliné, desquels partaient trois niveaux reliés par des montages.

Circonstances de l'accident. — Une explosion de grisou dont le lieu, les circonstances et les causes immédiates sont restées inconnues, brûla ou asphyxia les 15 ouvriers travaillant dans la mine.

La présence de l'acide carbonique et les éboulements ralentirent le sauvetage, qui dura 17 heures; on retira 9 cadavres et 6 blessés dont 2 succombèrent des suites de leurs brûlures.

Remarques particulières. — Une galerie en cul-de-sac, de 18^{m} de longueur, n'était aérée que par diffusion; un montage en percement, de 15^{m} de longueur, était aéré au moyen d'un ventilateur qui, placé à 10^{m} du courant d'air, ne faisait que brasser l'air et le grisou que ce montage pouvait contenir.

Depuis plusieurs jours les ouvriers signalaient la présence d'une abondante quantité de grisou et aucune précaution nouvelle n'avait été prise.

Le jour de l'accident, le temps était très orageux.

A. — MINES DE HOUILLE

1. — BASSIN DE [illegible]

12. — [illegible]

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
245	1855 26 Décembre	Puits Hippolyte.	2 Brûlés.	1 Brûlé grièvement.	290	80.810	? Accumulation de gaz explosibles entre deux barrages établis contre des feux. ou Formation d'un mélange détonant en un autre point de la mine.	? Feux d'incendie.	»
246	1866 9 Avril	Puits Jabin. — Niveau de 314 m	4 Brûlés.	1 Brûlé grièvement.	344	128.902	Suspension du travail et arrêt du ventilateur d'un chantier en cul-de-sac, dans l'intervalle de deux postes.	Lampe de sûreté dont le treillis avait rougi.	Maladresse de l'une des victimes, qui, voyant le treillis de sa lampe rougir, l'avait maniée sans précaution.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

Département de la Loire

La Terrenoire (suite).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — Les travaux du puits Hippolyte étaient abandonnés depuis près de deux mois, à cause des incendies qui s'y étaient déclarés. Dans la crainte de rallumer les feux, on ne laissait entrer dans la mine qu'une petite quantité d'air, et d'une manière intermittente.

Circonstances de l'accident. — Le Directeur et l'Ingénieur, après avoir visité une partie des travaux abandonnés depuis 2 mois sans trouver de traces de feu, avaient fait descendre les ouvriers pour construire un barrage dans le niveau de fond. Ce barrage ne présentant pas toutes les conditions de sécurité désirables, on en construisit un second à 3m 50 en avant, en y ménageant une porte pour le doubler intérieurement en briques. Le jour de l'accident, on faisait dans les parois de la galerie les entailles nécessaires pour établir ce doublage.

Le grisou se montrant entre les deux barrages on avait recommandé aux ouvriers de tenir leurs lampes près du sol. Une explosion s'étant produite, deux des ouvriers travaillant au barrage furent tués; le troisième, placé à quelques mètres en arrière, fut grièvement blessé; on retira immédiatement les victimes et on abandonna les travaux.

Les circonstances mêmes de l'accident sont restées inconnues.

Remarques particulières. — L'intervalle compris entre les deux barrages qu'on allait construire n'était aéré que par diffusion. On n'a pu savoir si l'explosion s'était produite entre les deux barrages ou si elle était venue de l'intérieur de la mine. D'autre part le sens dans lequel les barrages avaient été renversés n'était même pas connu avec certitude. Les lampes avaient été laissées sur les lieux.

La visite de la mine n'avait été faite qu'en partie avant la construction des barrages. L'introduction de l'air a pu déterminer la formation d'un mélange explosif en un point où le feu existait encore, ou rallumer l'incendie en un autre point.

Indications générales. — On commençait l'exploitation du niveau de 314m vers le Nord. Deux niveaux, longs de 100m chacun environ et reliés par des remontées aux extrémités, formaient un circuit d'aérage.

L'air descendait par la colonne du puits jusqu'à la recette inférieure de 314m, parcourait le niveau inférieur, et revenait par le niveau supérieur à la recette supérieure du puits à 312m, d'où il était envoyé par deux gaines en haut du puits. L'aspiration était produite dans l'une de ces gaines par un ventilateur Duvergier de 4 chevaux et dans l'autre par un jet de vapeur. Le courant d'air donnait 1mq. 33 par seconde.

Circonstances de l'accident. — Le niveau inférieur avait atteint, à 100m du puits, une faille ; on avait commencé, à 60m, un travers-bancs pour recouper la couche de l'autre côté. Il avait recoupé le mur de la couche relevée à 20m de distance et l'on suivait cette couche au delà, par une galerie d'allongement qui avait atteint 10m de longueur.

Le travers-bancs conduisant à la couche relevée était aéré par un ventilateur aspirant, dont la gaine d'aspiration prenait au front de taille, et dont la gaine de refoulement débouchait dans la galerie d'aérage.

Plusieurs ouvriers étaient depuis une demi-heure environ à leur travail ; l'un d'eux avait accroché sa lampe Davy près du tuyau de refoulement. Le mélange gazeux sortant de ce tuyau ayant fait rougir le treillis de la lampe, l'ouvrier voulut l'éteindre ; mais il la prit si maladroitement que le grisou s'enflamma et détermina une forte explosion qui le brûla mortellement ainsi que trois de ses camarades ; un cinquième ouvrier fut brûlé grièvement.

A. — MINES DE HOUILLE

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE

19. — Concessio

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
247	1871 19 Juin	Puits Jabin. — Région Nord — Petite couche du Treuil.	3 Brûlés.	»	411	120.752	Remontée en percement, de 10m de longueur, aérée seulement par diffusion.	Lampe Mueseler ouverte.	Imprudence de l'une des victimes, qui avait ouvert sa lampe.
248	id. 8 Novembre	id. — Grande et petite couches du Treuil.	70 Brûlés et asphyxiés	»	id.	id.	Insuffisance et mauvaise distribution du courant d'air. Grand nombre et développement des travaux montants. Activité excessive de l'exploitation.	Lampe de sûreté détamisée.	Négligence dans la surveillance des lampes de sûreté.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de Terrenoire (suite).

OBSERVATIONS.

11

Quelques éboulements se produisirent dans le niveau inférieur et dans les remontes. Les flammes ne s'étendirent pas très loin dans le niveau, mais elles envahirent tout le travers-bancs.

Remarques particulières. — Le ventilateur avait été arrêté pendant une heure dans l'intervalle des deux postes. Il venait d'être remis en fonctions depuis une demi-heure, au moment de l'accident.

Indications générales. — L'aérage se faisait naturellement entre le puits Jabin et le puits du Gagne-Petit ou Saint-François. La branche du courant d'air qui aérait la région Nord se divisait entre la couche principale et la petite couche.

Circonstances de l'accident. — Une remontée en percement dans la Petite Couche avait atteint 10^m de longueur ; 3 ouvriers travaillant à son avancement venaient d'arriver au chantier quand l'un d'eux, en ouvrant sa lampe Muëseler, détermina l'explosion d'une petite quantité de grisou accumulée à la partie supérieure de la remontée. Les trois ouvriers furent brûlés mortellement.

Remarques particulières. — La ventilation était suffisante dans la galerie passant au pied de la remontée.

La clef qui avait servi à ouvrir la lampe, cause de l'explosion, fut retrouvée sur cette lampe même, après l'accident ; elle avait été confiée précédemment à l'ouvrier, qui avait été chef de poste pendant quelque temps ; il avait prétendu l'avoir égarée, lorsque le sous-gouverneur la lui avait redemandée.

Indications générales. — L'aérage général se faisait naturellement entre le puits Jabin et le puits Saint-François. Le courant d'air général était assez actif ; il était partagé en trois courants principaux : l'un au Nord (région du Treuil), l'autre au Centre, et le troisième au Sud (région de la Richelandière).

Le volume d'air était insuffisant, il n'était que de 9 à 11 mètres cubes par seconde, pour une extraction journalière de 410 tonnes.

La distribution de l'air était défectueuse en certains points, surtout dans la petite couche dont une grande partie n'était aérée que par diffusion. Le courant d'air n'était pas conduit vers les points extrêmes de l'exploitation et aussi près que possible des fronts de taille. Il était descendant en plusieurs points et la voie servant de retour d'air pour les 2/3 de la mine, était basse et étroite.

Des niveaux entiers étaient en dehors du courant d'air et n'étaient aérés que par l'air qui filtrait à travers les portes d'aérage.

Dans les remontées, on chassait le grisou avec de petits ventilateurs aspirants ; quand le gaz était abondant, on y adjoignait des ventilateurs soufflants, qui prenaient l'air dans un courant lent et déjà vicié par un long circuit.

Dans la région du Nord et dans celle du Centre, il y avait de nombreux incendies ; dans les dépilages remblayés, ces incendies étaient circonscrits par des barrages.

Le champ d'exploitation était très étendu : 200^m au Nord et 300^m au Sud. Le quartier Nord comprenait la petite couche en traçage et la grande couche en partie remblayée, entre le 1er et le 5e niveaux et sur deux niveaux en descente ; l'air passait d'abord par les travaux de la petite couche, puis par ceux des 6e et 7e niveaux de la grande couche. Le quartier du Centre était dépilé et remblayé pour 1/4 environ ; les 6e et 7e niveaux étaient en traçage. L'air du quartier Nord passait en haut du quartier du Centre pour se rendre au puits de sortie d'air. Le quartier du Sud était en traçage sur trois niveaux ; il ne communiquait avec les précédents que par un faux puits et une seule galerie vers les puits d'air.

A. — MINES DE HOUILLE.

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

12. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
249	1875 3 Octobre	Puits Jabin.	0	0	506	181.682	Soufflards ouverts par un coup de mine à la sole d'une galerie au charbon et à la rencontre d'une faille.	Flamme d'un coup de mine.	»

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

1. — Département de la Loire.

Bassin de Rive-de-Gier et Roannais... **[header partially cut]** Commentaire (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Le quartier du Nord et le quartier du Centre donnaient beaucoup de gaz, surtout le premier ; celui du Sud n'en donnait presque pas, et le grisou y avait été rarement signalé ; une grande faille séparait ce dernier du précédent.

Circonstances de l'accident. — On exploitait au puits Jabin la grande couche du Treuil et une petite couche considérée comme une dépendance de la première. Une explosion de grisou se produisit dans les travaux, embrassant une étendue considérable : toute la région du Treuil du Nord et la région centrale. La région Richelandière au Sud ne fut préservée que parce que le grisou y était peu abondant. La commotion fut ressentie au jour ; une colonne de fumée épaisse sortit du puits Saint-François, servant au retour de l'air, et une benne vide qui se trouvait dans ce puits, fut projetée jusqu'aux molettes.

Au moment de l'accident, 92 ouvriers seulement se trouvaient dans la mine ; on ne put pénétrer dans les travaux qu'au bout de deux heures et on retrouva 22 ouvriers vivants, appartenant tous aux chantiers de la Richelandière.

Onze ouvriers, qui auraient pu être sauvés s'ils eussent remonté le courant d'air, s'étaient dirigés par erreur vers le puits de sortie d'air, d'où l'on n'a pu les retirer de suite, et au pied duquel ils sont morts asphyxiés par l'oxyde de carbone; quand on les retrouva, leurs lampes brûlaient encore à leurs pieds.

Par suite des nombreux éboulements qu'il fallut relever, les derniers cadavres ne purent être retirés que 62 jours après l'accident.

Remarques particulières. — Des croûtes de coke étaient déposées sur les bois dans toutes les parties mal aérées, dans les remontées en percement ou les régions en dehors du courant d'air qui pouvaient servir de réservoirs au grisou ; dans les galeries, ces croûtes se trouvaient sur les deux faces des bois, ce qui a fait penser que les flammes y avaient stationné, allant et revenant sans grande vitesse ; dans les chantiers en cul-de-sac, les dépôts n'existaient que sur les faces tournées vers les fronts de taille, et indiquaient des explosions locales parties de ces fronts.

Il y a eu deux centres d'explosion, probablement allumés l'un par l'autre. Les flammes ont été d'une part jusqu'au puits Jabin, c'est à dire à 200^{m} au moins de distance en remontant le courant d'air, et de l'autre au puits Saint-François et à l'entrée de la région Sud, à plus de 250^{m} du foyer.

Le point de départ de l'explosion n'a pu être déterminé avec certitude ; mais il est à peu près certain que l'accident est dû à l'ouverture d'une lampe de sûreté. Les lampes étaient du type Mueseler. Sur 72 qui ont été retrouvées, 5 étaient ouvertes, 45 n'avaient ni cheminée ni diaphragme et 17 ne fermaient pas à clef.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Les exploitants ont été invités à améliorer l'aérage et à interdire provisoirement tout travail dans les niveaux supérieurs ou niveaux de sortie d'air.

Circonstances de l'accident. — Un coup de mine ayant mis à découvert trois soufflards à la sole d'une galerie au charbon et à la rencontre d'une petite faille, le gaz sortant de ces soufflards s'enflamma sans explosion. Le charbon du front de taille, qui avait commencé à brûler, fut éteint sans difficulté. Il n'y eut personne d'atteint.

Remarques particulières. — Le chef de poste avait visité le chantier avant l'allumage du coup de mine ; il avait constaté l'absence du grisou entre les chapeaux des cadres.

A. — MINES DE HOUILLE

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE

12. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
250	1876 4 Février	Puits Jabin. — Grande et petite couches du Treuil.	186	12	392	63.516	? Forte dépression barométrique signalée le jour de l'accident.	? Allumettes enflammées imprudemment. ou Feux d'un incendie spontané.	?

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de Terrenoire (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'air entrait par le puits Jabin. Le courant se divisait en trois branches : la première aérait la région de la Richelandière ; la deuxième, une partie de la région centrale ; la troisième se subdivisait en deux parties, l'une passait dans la région centrale, l'autre dans la région du Treuil et se réunissait ensuite à la précédente.

Les trois branches sortaient par le puits Saint-François sur lequel était établi un ventilateur Guibal débitant 15^{m3} d'air par seconde pour une extraction de 400 tonnes.

Le courant de la Richelandière était de beaucoup le plus fort; celui du Treuil était le plus faible.

La marche de l'air était constamment ascendante, sauf à la sortie de la région centrale, où le courant descendait de 6^m sur une longueur de 450^m avant d'atteindre le puits Saint-François ; le courant d'air était vif malgré la descente. Cette marche était assez bien réglée par des portes, sauf dans la région du Treuil, où le courant parcourait plusieurs circuits assez mal déterminés ; néanmoins l'air y était assez frais et abondant.

Enfin les galeries de retour d'air avaient des sections un peu faibles, eu égard à la masse d'air qui y circulait.

Le courant de la Richelandière se réunissait aux deux autres à 76^m seulement du puits de sortie, de sorte que cette région pouvait être considérée comme isolée des régions centrales e tdu Treuil ; l'isolement était encore complété par des portes Verpilleux établies dans le retour d'air, avant la jonction des courants.

On exploitait au puits Jabin, la grande couche (8e couche) et la petite couche supérieure. Le grisou se montrait dans la région du Treuil et dans la région centrale, mais celle de la Richelandière en était exempte.

Depuis le précédent accident du 8 Novembre 1871, de nombreuses améliorations avaient été apportées dans la mine : un ventilateur avait assuré l'aérage ; la distribution de l'air avait été rendue meilleure ; la région de la Richelandière avait été isolée; le nombre des galeries en remonte avait considérablement diminué ; la lampe Mueseler avait été adoptée exclusivement et son mode de fermeture paraissait en rendre l'ouverture impossible ; enfin le tirage à la poudre avait été défendu dans les galeries au charbon.

Circonstances de l'accident. — Le 4 février, pendant le poste de jour, une explosion de grisou se produisit dans les travaux. La détonation fut entendue au jour ; une colonne de fumée noire et épaisse sortit par les deux puits Jabin et Saint-François ; au premier puits elle ne dura que 4 à 5 secondes, mais au second, elle dura plusieurs heures.

Le courant d'air n'ayant subi aucune altération, on put immédiatement commencer le sauvetage. Sur 211 ouvriers descendus dans la mine, 28 seulement purent être retirés vivants : 13 sains et saufs, les 15 autres plus ou moins grièvement blessés ; trois de ces derniers succombèrent aux suites de leurs blessures.

L'explosion s'était propagée dans toutes les parties de la mine ; la région de la Richelandière, isolée cependant des deux autres, n'avait pas été épargnée. Les quelques ouvriers saufs se trouvaient dans deux descentes en percement au rocher, ou dans le voisinage du puits Jabin.

Un grand nombre d'éboulements s'étaient produits, aussi la recherche des cadavres fut longue et difficile. Un incendie s'étant déclaré le lendemain de l'explosion, dans la région du Treuil, cette partie de la mine, contenant une trentaine d'ouvriers, fut barrée. Deux mois après l'accident, il restait encore 8 ou 10 cadavres dans les deux autres régions.

Remarques particulières. — Les poussières de houille paraissent avoir joué un certain rôle dans l'accident ; le sens dans lequel les croûtes de coke avaient été déposées sur les bois semblait indiquer que les flammes étaient allées de la région du Treuil vers le puits Jabin, de la région centrale vers les deux puits et de la région de la Richelandière vers le puits Jabin.

A. — MINES DE HOUILLE

1. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE

13. — Concession

N° d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						Tonnes			
251	1877 11 Janvier	Puits d'Avaise	»	1 Brûlé légèrement.	464	81.281	Suspension du travail dans l'intervalle de deux postes, à l'avancement d'un chantier en remonte dans lequel descendait cependant le courant d'air.	Lampe à feu nu.	Négligence du gouverneur, qui n'avait pas visité le chantier avant l'arrivée des ouvriers.

2. — GROUPE DE LA LOIRE.

a. — Département de la Loire.

de Terrenoire (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Le point de départ de l'explosion a dû être la région du Treuil, la seule partie de la mine d'où les flammes paraissaient être sorties en deux sens opposés.

Quant aux causes de l'accident, elles sont restées inconnues; les percements étaient généralement conduits en niveau ou en descente ; il n'y avait que trois chantiers en remonte, de très faible longueur, dans la région du Treuil et un dans la région centrale. Les lampes Muëseler employées ne pouvaient s'ouvrir qu'avec un électro-aimant ; elles étaient l'objet d'une surveillance très rigoureuse et rien n'indiquait avant l'accident que les ouvriers fussent parvenus à les ouvrir ; toutes celles qui ont été retrouvées étaient fermées. Le tirage à la poudre n'était permis que dans les galeries au rocher ; les coups étaient allumés par le sous-gouverneur ; cette dernière prescription n'était pas toujours suivie, il est vrai, mais il n'y avait pas alors de travail au rocher dans la région du Treuil.

L'hypothèse la moins invraisemblable serait qu'un ouvrier eût allumé du feu pour fumer.

Il ne serait pas impossible non plus que l'incendie reconnu le lendemain de l'accident fut, de fait, antérieur à l'explosion et qu'il eût occasionné cette dernière ; des incendies spontanés s'étaient déjà produits plusieurs fois dans la Grande-Couche.

La propagation des flammes dans la mine entière et particulièrement dans la région non grisouteuse de la Richelandière, a été considérée comme résultant, d'une part de la nature sèche et poussiéreuse de la mine, d'autre part d'une forte dépression barométrique, constatée le jour de l'accident, qui aurait fait sortir une quantité notable de grisou des vieux travaux de la Richelandière, alors en grande partie dépilée et plus ou moins bien remblayée.

Indications générales. — L'air entrait par une fendue et sortait par le puits d'Avaise ; le courant était descendant dans une partie des travaux ; toutefois l'aérage était suffisant.

Au *puits* d'Avaise, le grisou ne s'était encore montré qu'une seule fois et en faible quantité dans un chantier en remonte, pendant le traçage des derniers lambeaux de la couche. Le sous-gouverneur visitait les chantiers avant l'arrivée des ouvriers.

Circonstances de l'accident. — A côté d'une remontée par laquelle descendait l'une des branches du courant d'air, on perçait une deuxième remontée contigüe à la première que l'on remblayait au fur et à mesure de l'avancement. Deux ouvriers occupés à ce travail arrivaient à leur chantier avec des lampes à feu nu, lorsque l'un d'eux, parvenu à 2m50 environ du front de taille, détermina l'inflammation d'une petite quantité de grisou et fut légèrement brûlé ; l'autre ouvrier, qui se trouvait à quelques mètres en arrière, vit la flamme, mais ne fut pas atteint.

Remarques particulières. — Le sous-gouverneur n'avait pas encore fait la visite du chantier où l'accident s'est produit, quand les ouvriers étaient arrivés à leur travail ; il ne l'eût d'ailleurs visité qu'avec une lampe à feu nu, ce chantier se trouvant dans le courant d'air.

Cet accident montre la nécessité de visiter avec une lampe de sûreté tous les chantiers, même ceux où passe le courant d'air, lorsque le grisou est à craindre dans une région.

(La suite à une prochaine livraison).

NOTE SUR LE COMPENSATEUR SYSTÈME DUJOUR

POUR ASSURER LA MANŒUVRE DES SIGNAUX A GRANDE DISTANCE EN CAS DE RUPTURE DU FIL DE LA TRANSMISSION

Par M. SCHLEMMER, inspecteur général des ponts et chaussées.

On a reconnu que, pour assurer la manœuvre des signaux placés à grande distance des points qu'ils doivent protéger, l'appareil destiné à annuler les effets de la température sur la longueur du fil de la transmission du mouvement devait être placé entre le levier de manœuvre et le signal.

Pour ce motif on a été obligé de renoncer au système de compensateur qui se plaçait en arrière du levier de manœuvre, à l'origine de la transmission, et qui a été longtemps exclusivement employé à la compagnie de Lyon.

Le compensateur intermédiaire placé entre le levier et le signal, fonctionne comme appareil de relai, c'est-à-dire que, à chaque manœuvre du levier, il fait marcher en sens opposés les deux parties du fil de la transmission séparées l'une de l'autre par cet appareil.

Il existe deux systèmes de compensateurs intermédiaires : le système Robert, employé par les compagnies du Nord, de l'Ouest et du Midi, et le compensateur Dujour, employé par la compagnie de Lyon.

L'un et l'autre ont été disposés de manière que, s'il y a rupture du fil, elle se produise entre le compensateur et le signal, ou entre le levier de manœuvre et le compensateur : le signal se met alors à l'arrêt immédiatement.

Le compensateur Robert se place au milieu de la longueur de la transmission, et le contrepoids de tension du fil monte ou descend entre deux poteaux élevés au-dessus du sol, suivant les variations de la température. A longueur de transmission égale, il faut le même effort pour la manœuvre du signal que dans le cas du compensateur placé à l'origine.

Le compensateur Dujour se compose de poulies sur lesquelles s'enroule ou se déroule le fil de la transmission du signal, suivant les variations de la température. Les fils restent à peu de distance du sol, à la hauteur qui leur est donnée ordinairement dans la pose de la transmission.

Il se place en général aux deux tiers de la longueur de la transmission, afin de réduire au minimum l'effort à exercer au levier de manœuvre, pour faire tourner le signal de 90 degrés (*).

Voici une description sommaire de l'appareil compensateur, système Dujour :

Il se compose (voir *fig.* 13, 14 et 15, Pl. V), de deux poulies de diamètre inégal.

La grande poulie porte deux gorges : sur l'une passe le fil qui vient du levier de manœuvre ; sur l'autre, la chaîne qui porte le contrepoids de relais et de compensation. La

(*) On trouvera dans la *Revue générale des chemins de fer*, novembre 1880, une note détaillée de M. Jules Michel, ingénieur des ponts et chaussées, contenant un examen analytique du fonctionnement des fils de disques, des résistances diverses qu'ils ont à surmonter, un exposé des considérations qui lui ont fait placer le compensateur aux deux tiers de la longueur de la transmission, et le calcul de la diminution qui en résulte dans l'effort au levier de manœuvre.

chaîne passe en outre sur une poulie placée au-dessus afin d'éviter les puits en usage sur la compagnie du Nord, aussi bien que le relèvement de l'appareil admis par la compagnie de l'Ouest pour les compensateurs Robert. Le contrepoids est plus ou moins chargé suivant la longueur de la transmission et suivant les résistances qu'il doit vaincre.

La petite poulie reçoit le fil qui va au disque. Elle pourrait n'avoir qu'une gorge d'un rayon moitié moindre que celui de la grande poulie, mais on lui a donné deux gorges de rayons légèrement différents pour permettre de faire varier, dans une certaine limite, l'emplacement du compensateur sur la transmission, et pour éviter ainsi des obstacles tels que des ouvrages d'art ou des tranchées étroites qui en rendraient la pose difficile. Le diamètre de la grande poulie étant $0^m,300$ on a donné $0^m,140$ et $0^m,160$ aux deux gorges de la petite poulie.

Avec l'appareil de relais tel qu'on vient de le décrire, où les fils ont des mouvements inverses, le rappel met le disque à l'arrêt lorsque la transmission est tendue entre le levier de manœuvre et le compensateur; elle est alors détendue entre le compensateur et le disque. Le disque s'efface par le mouvement inverse.

Une rupture équivalant à une détente du fil, le disque se mettra donc à l'arrêt de lui-même si elle se produit dans la seconde partie de la transmission. Au contraire, si la rupture a lieu dans la première partie, le disque devrait s'effacer.

Pour remédier à cet inconvénient, M. Dujour, inspecteur principal, chef du bureau des études à la compagnie du chemin de fer de Lyon, a imaginé une disposition ingénieuse. La petite poulie C, au lieu d'être calée sur l'arbre qui porte la grande poulie B, est folle sur cet arbre. Elle est rendue solidaire du système au moyen d'un levier E ou crochet à branches inégales, mobile sur un tourillon

fixé à la grande poulie. La branche la plus courte H s'appuie sur un taquet I, venu de fonte avec la petite poulie, et l'entraîne dans son mouvement. A l'extrémité F de la plus longue branche est attaché le fil commandé par le levier de manœuvre.

Lorsque le fil vient à se rompre, le crochet, devenu libre, n'agit plus sur la petite poulie, qui cède sous l'action du contrepoids de rappel du disque. Celui-ci tombe en ramenant le disque à l'arrêt, comme si la rupture avait eu lieu entre le disque et le compensateur.

Il n'est pas inutile de signaler la nécessité de disposer d'une grande course au levier de manœuvre d'une transmission munie du compensateur Dujour, surtout quand le disque est à grande distance. Aussi, la compagnie de Lyon a fait exécuter des leviers à secteur elliptique, qui donnent jusqu'à 1 mètre d'amplitude entre les deux positions extrêmes (voir *fig.* 16). Avec le compensateur intermédiaire, une course insuffisante peut avoir des inconvénients sérieux ; au contraire, si la transmission est bien réglée, un excès de course au levier de manœuvre n'a jamais d'inconvénient.

LÉGENDE EXPLICATIVE DES FIGURES.

Planche V.

Fig. 13. Élévation de l'appareil, montrant la disposition des poulies, des fils de transmission et du contrepoids destiné à faire basculer le crochet E en cas de rupture du fil de manœuvre.

Fig. 14. Vue de face du même appareil.

Fig 15. Détail des poulies montrant la disposition du crochet E, à la plus longue branche duquel s'attachent le fil de manœuvre en F, et le fil du contrepoids, et dont la plus courte branche H entraîne, en s'appuyant sur le taquet I, la poulie C à laquelle est attaché le fil de transmission.

Fig. 16. Levier de manœuvre à secteur elliptique.

BULLETIN DES TRAVAUX DE CHIMIE

EXÉCUTÉS EN 1881

PAR LES INGÉNIEURS DES MINES

DANS LES LABORATOIRES DÉPARTEMENTAUX

I.— LABORATOIRE DE CLERMONT-FERRAND.

Travaux de M. de BÉCHEVEL, ingénieur des mines (EXTRAIT).

1° *Minerai de zinc et de plomb argentifère* recueilli dans la mine d'Aurouze (Haute-Loire), quartier de la Salzède.

Ce genre de minerai se distingue nettement du remplissage ordinaire des filons d'Aurouze; il renferme une proportion importante de blende, et présente une structure caverneuse toute spéciale. La gangue est quartzeuse et barytique, mais le quartz l'emporte sur la baryte, contrairement à ce qui a lieu dans les filons voisins.

Le minerai s'altère assez promptement à l'air, et devient noirâtre.

Un premier enrichissement de la prise d'essai a été effectué par broyage et tamisage.

La gangue, plus dure que les parties métalliques, est restée, pour majeure partie, en fragments, tandis que les sulfures traversaient le tamis; 82 grammes de minerai brut ont ainsi fourni 24gr. de minerai fin, sur lequel a porté l'analyse, et 58gr. de gangue, où il ne restait qu'une proportion insignifiante de matière métallique.

Composition centésimale :

Gangue insoluble (quartz et sulfate de baryte). . .	41,50
Soufre	16,215
Fer (à l'état métalique)	2,22
Plomb	4,72
Zinc	31,03
Cuivre	traces.
Antimoine, arsenic	traces.

En considérant le fer comme se trouvant à l'état de carbonate, et le plomb et le zinc à l'état de sulfures, on obtient le tableau suivant :

Gangue insoluble	41,50
Sulfure de plomb	5,45
Carbonate de fer	4,60
Blende	46,30
Sulfures de cuivre, d'antimoine, d'arsenic, et matières non dosées	2,15

2° *Remplissage filonien d'Aurouze.* — Le remplissage dont il s'agit se trouve au milieu d'un filon barytique, où la Société des mines d'Aurouze a fait, dans le cours de l'année 1881, des travaux de recherche assez importants.

Le filon présente une largeur sensiblement constante, et c'est dans la partie moyenne, sur les parois d'une fissure incomplétement incrustée, que s'est formé le dépôt noirâtre soumis à l'analyse. Ce dépôt ne pouvant être facilement détaché du sulfate de baryte sur lequel il repose, nous avons pris comme échantillon d'analyse un fragment de roche, qui a été broyé avec soin, de manière à fournir un mélange homogène.

L'échantillon ne renferme ni plomb, ni cuivre, ni antimoine en quantités appréciables.

Gangue insoluble. 91,40	{	BaO. SO^3.	63,98	
		Quartz . .	27,42	100,51
Fe^2O^3			2,28	
$FeO. CO^2$.			6,83	

3° *Antimoine sulfuré.* — Échantillon provenant de la mine de la Licoulne (Haute-Loire).

Composition centésimale

Gangue insoluble (BaO. SO^3 et quartz)	31.80
Fer	2,24
Plomb	1,06
Cuivre	traces.
Antimoine (par différence)	46,22
Soufre	18,68

De ces résultats on peut déduire le tableau suivant :

Gangue insoluble (BaO. SO^3 et SiO^2)	31,80
Sulfure de fer	3,49
Galène	1,23
Sulfure d'antimoine	63,48
	100,00

II. — LABORATOIRE DU MANS.

Travaux de M. LODIN, ingénieur des mines.

§ 1er. — Engrais.

Les analyses d'engrais constituent la partie la plus importante des travaux du laboratoire du Mans; elles ont été en 1881 au nombre de 53. Les engrais analysés sont pour la plupart des guanos et des superphosphates; le laboratoire a reçu également un certain nombre d'échantillons de sulfate d'ammoniaque et d'engrais chimiques complexes sans désignation précise. Dans tous les échantillons présentés, on a déterminé la perte par dessiccation à 110°, l'azote, l'acide phosphorique des phosphates solubles dans le citrate d'ammoniaque, enfin l'acide phosphorique total ; le dosage de la potasse n'a été fait que lorsque l'on a eu des raisons

spéciales de soupçonner la présence de cette substance. Le tableau de tous les résultats obtenus ne présente aucun intérêt général; nous nous bornerons à présenter quelques observations sur les méthodes employées et sur les particularités présentées par certaines analyses.

1° *Dosage de la potasse.* — Le procédé suivi est celui de Sérullas, modifié par M. Schlœsing; il est d'une application sûre et assez rapide et n'a donné lieu à aucune difficulté.

2° *Dosage de l'azote.* — Dans un certain nombre de cas, on a dosé à part l'azote ammoniacal et l'azote organique, en faisant dégager à froid l'ammoniaque par l'addition d'un excès de potasse caustique, suivant la méthode indiquée par M. Schlœsing, et dosant ensuite dans le résidu, par calcination avec la chaux sodée, l'azote des matières organiques. Quand l'ammoniaque libre était en faible proportion, on a appliqué immédiatement le deuxième procédé, en ayant soin d'opérer rapidement le mélange.

Une détermination contestée nous a donné l'occasion de constater le peu d'homogénéité de certains engrais, de composition bien définie cependant en apparence. Un échantillon de sulfate d'ammoniaque avait donné une discordance considérable (16,40 p. 100 au lieu de 19,09) avec la teneur indiquée par le vendeur, d'après une analyse de M. Maret, chimiste à Paris. Le dosage d'azote fut refait et donna des résultats concordants à 0,1 p. 100 près avec le premier résultat obtenu; nous fîmes alors l'analyse complète de l'échantillon que nous avions reçu et de celui que M. Maret nous avait communiqué. Ces deux analyses donnèrent les résultats suivants :

	Échantillon primitif.	Échantillon de M. Maret.
Acide sulfurique (SO^3)	60,49	57,48
Ammoniaque ($Az H^3$).	19,92	22,96
Eau combinée (calculée).	13,61	12,68
Eau hygrométrique	0,92	4,19
Protoxyde de fer.	0,49	1,25
Résidu insoluble	3,20	1,03
	98,63	99,59
Azote	16,40	18,91

La comparaison de ces deux résultats prouve que l'une au moins des deux prises d'essai était défectueuse. Le premier échantillon contenait une quantité assez considérable d'acide sulfurique libre ; tous les deux renfermaient du fer en proportion notable.

3° *Dosage de l'acide phosphorique.* — De nombreux essais ont été faits pour apprécier l'exactitude des diverses méthodes proposées jusqu'ici pour doser l'acide phosphorique ; sans en donner ici les résultats numériques, nous résumerons rapidement les conclusions auxquelles nous avons été conduit jusqu'ici.

Le procédé indiqué par M. Boussingault et modifié par Rivot, c'est-à-dire le traitement par l'acide sulfurique et l'alcool, avec ou sans addition de sulfate d'ammoniaque, exige trop de temps et de soins pour convenir au travail courant d'un laboratoire, car l'on doit faire un grand nombre de dosages d'acide phosphorique.

L'emploi de l'azotate de bismuth exige que la dissolution ne contienne ni sulfate ni chlorure ; il donne de bons résultats en présence des alcalis, de la chaux, de la magnésie et des autres protoxydes, même en présence de l'alumine, pourvu que l'on emploi un excès suffisant de réactif, mais le sesquioxyde de fer empêche complétement la précipitation du phosphate de bismuth.

Il y a là une difficulté qu'on n'a pu vaincre jusqu'ici d'une manière satisfaisante et qui empêche d'employer le procédé pour des essais pratiques.

L'emploi du molybdate d'ammoniaque en présence d'un grand excès d'acide azotique convient bien à la détermination de quantités très faibles d'acide phosphorique. Nous avons constaté, il est vrai, que la présence de plomb ou de bismuth dans la dissolution empêche la précipitation du phosphomolybdate ; mais ces métaux ne se rencontrent jamais dans les engrais ni dans les produits industriels contenant de l'acide phosphorique ; d'ailleurs on les séparerait facilement au besoin. Lorsqu'on veut obtenir un dosage exact au moyen du phosphomolybdate d'ammoniaque, il convient de redissoudre le précipité dans un peu d'ammoniaque et de précipiter dans cette liqueur le phosphate ammoniaco-magnésien.

Nous avons appliqué cette méthode toutes les fois qu'il s'est agi de rechercher de très faibles quantités d'acide phosphorique; mais tous les dosages courants ont été faits par précipitation sous forme de phosphate ammoniaco-magnésien en liqueur citrique et ammoniacale. Jusqu'à la fin de 1881, on a procédé en pesant le précipité calciné et transformé ainsi en pyrophosphate de magnésie; il est alors indispensable de redissoudre le précipité primitif dans un peu d'acide azotique et de le précipiter de nouveau par l'ammoniaque.

En effet, lorsqu'on opère en présence d'une grande quantité d'acide citrique, on obtient une précipitation incomplète si l'on n'introduit pas dans la liqueur un excès assez considérable de sel magnésien, comme M. Joulie l'avait déjà indiqué et comme nous l'avons vérifié par des expériences directes. La précipitation est rapide et complète si l'on ajoute le sel magnésien en grand excès, mais alors le précipité entraîne de la magnésie dont il faut le débarrasser par une deuxième précipitation. Après cette opération le phosphate ammoniaco-magnésien présente sa composition normale; mais sa calcination présente néanmoins quelques difficultés, puisqu'il retient toujours un peu d'acide citrique. Aussi, avons-nous, depuis le commencement de 1882, adopté purement et simplement le procédé Joulie, se résumant en une précipitation en liqueur citro-ammoniacale, en présence d'un excès de magnésie, redissolution du précipité obtenu et enfin, une fois l'acide phosphorique séparé de sesquioxydes, précipitation par une solution titrée d'urane en liqueur faiblement acétique. Cette méthode est rapide et donne des résultats fort exacts; elle rend le dosage ultérieur des bases à peu près impossible, mais c'est là un point qui a peu d'importance lorsqu'il s'agit de l'analyse des engrais.

Le procédé de M. Joulie comprend également la détermination de la solubilité relative des divers phosphates au moyen d'une dissolution de citrate d'ammoniaque ammoniacal, employée dans des conditions constantes et bien définies. Ce mode d'évalution du degré d'assimilabilité de l'acide phosphorique contenu dans les engrais est purement empirique et il serait nécessaire de faire des

expériences agricoles directes pour en contrôler la valeur. Des faits nombreux sembleraient indiquer que l'acide phosphorique insoluble dans le citrate d'ammoniaque ne donne pas des résultats agricoles notablement inférieurs à ceux donnés par le phosphate soluble ; des expériences de M. Petermann et de MM. Albert et Wagner viennent à l'appui de cette opinion. Actuellement l'emploi du citrate d'ammoniaque est tellement répandu dans la pratique qu'on ne peut s'en dispenser ; il risque cependant de donner lieu à des difficultés analogues à celles qu'avait soulevées autrefois la solubilité dans l'eau pure comme terme de comparaison. La rétrogradation paraît se produire dans un cas comme dans l'autre, bien qu'avec une moindre intensité, et elle peut avoir parfois une assez grande importance comme nous avons eu l'occasion de le constater dans le cas suivant. Un échantillon, envoyé par M Hurrau, de Loué-sous-Ballon, donna à l'analyse 7,1 p. 100 d'acide phosphorique soluble dans le nitrate d'ammoniaque, alors que l'engrais dont il provenait avait été vendu comme devant en contenir 12 à 13 p. 100. Cette discordance considérable nous détermina à faire l'analyse complète de l'échantillon, qui contenait :

Eau	7,58
Argile et quartz	5,40
Acide phosphorique	16,40
Acide sulfurique	33,78
Chaux	22,80
Alumine	8,70
Oxyde de fer	4,17
	98,68

On peut interpréter de la manière suivante la constitution des superphosphates en question.

Eau	7,88
Acide insoluble	5,40
Sulfate de chaux	55,37
Acide sulfurique libre	1,21
Phosphates de sesquioxydes	29,10
Acide phosphorique en excès	0,17
	98,63

La quantité d'acide sulfurique employée dans la fabrication de ce superphosphate était plus que suffisante puisqu'il reste un excès d'acide après formation de sulfate de chaux et de phosphates de sesquioxydes. Cependant la rétrogradation observée prouve qu'il a dû se former, malgré l'excès d'acide, du superphosphate basique de formule 2 PhO^5, 3 Fe^2O^3, 8 HO, le seul des phosphates de fer qui soit insoluble dans le citrate d'ammoniaque commercial. Ce fait prouve, comme l'a déjà indiqué (1) M. Millot, qu'il est impossible d'éviter une rétrogradation assez importante lorsqu'on emploie pour la fabrication des superphosphates des matières premières riches en oxyde de fer, comme les nodules des Ardennes ou de l'Auxois. Cette rétrogradation n'a peut être pas de bien grands inconvénients au point de vue agricole, comme nous l'avons dit plus haut, mais elle peut devenir une source de difficultés graves dans le commerce des engrais.

§ 2. — Terres.

Cinq échantillons de terres ont été envoyés au laboratoire dans le courant de 1881, leur analyse a donné les résultats suivants :

	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4	N° 5
Composition physique.					
Argile et sable fin	95,62	83,50	44,85	81,00	93,56
Gros sable, graviers, etc. .	4,38	16,50	54,15	19,06	6,56
Composition chimique.					
Humidité	3,92	3,20	7,87	0,80	2,61
Perte par calcination . . .	10,90	9,89	12.42	1,85	5,91
Chaux	9,20	4,00	traces	1,12	0,32
Alumine et oxyde de fer . .	8,80	8,50	2,30	1,68	7,70
Résidu insoluble dans les acides	67,30	74,85	77,05	94,15	83,46
	100,12	100,14	99,84	100,00	100,00

(1) *Annales agronomiques.*

N° 1. — Échantillon envoyé par M. de Prunelé, propriétaire au Mans.

N° 2. — Échantillon envoyé par M. Paul Luzu, agriculteur à la Jeulinière, près Bouloire.

N° 3. — Echantillon envoyé par M. Lebel Delaunay, propriétaire à La Suze.

N° 4. — Échantillon envoyé par M. Launay, professeur d'agriculture au Mans.

N° 5. — Échantillon envoyé par M. Derfas, au Mans.

§ 3. — Calcaires.

	N° 1	N° 2
Résidu insoluble.	0,30	0,65
Alumine et oxyde de fer.	0,15	0,85
Chaux.	55,50	50,87
Magnésie	0,75	0,95
Perte par calcination	44,30	41,33
	101,00	100,65

N° 1. — Calcaire oolithique très compact employé comme pierre de taille, il provient de Villaines-la-Carelle (Sarthe) et appartient au niveau de la grande oolithe.

N° 2. — Calcaire cénomanien, employé comme marne dans les environs de Bessé (Sarthe).

§ 4. — Combustibles.

1° *Combustible anthraciteux*, d'âge probablement rhétien, provenant de Ujbanya, près Orsova (Banat); il présente à peine

quelques symptômes d'agglomération par calcination au creuset fermé. Son analyse immédiate a donné :

Eau hygrométrique.	1,30
Matières volatiles	13,86
Carbone fixe	74,74
Cendres.	10,10
	100,00
Soufre	0,68
Plomb réduit par 1gr	28,90

2° Une série d'analyses et de dosages de soufre a été faite sur des échantillons de combustibles provenant de Brittof (Carniole); les résultats ont été indiqués dans une note spéciale. (*Annales des Mines*, 1er volume de 1883, p. 209).

Notes sur les procédés de dosage du soufre. — Les procédés usités jusqu'à présent pour doser le soufre dans les combustibles sont assez longs et peu commodes. L'eau régale, le chlorate de potasse en présence de l'acide chlorhydrique n'amènent que très difficilement la destruction complète des matières organiques, chose indispensable si l'on veut pouvoir répondre de l'exactitude du dosage du soufre. L'emploi du chlore et de la potasse, recommandé par Rivot, donne lieu souvent à des difficultés imprévues; ainsi dans le traitement d'un combustible de Brittof (Carniole), la matière s'est dissoute intégralement en donnant une liqueur rouge vif et a ensuite donné un précipité rouge brun lorsqu'on a saturé la potasse par l'acide chlorhydrique; après séparation de cette substance, on n'a obtenu que 0,92 p. 100 de soufre, alors qu'on aurait du trouver 1,9.

L'emploi de la voie ignée, c'est-à-dire du nitre et de la potasse, est plus rapide et donne des résultats généralement plus certains. Il peut néanmoins conduire parfois à des chiffres trop faibles lorsqu'on fond d'avance la potasse pour éviter les projections; dans ces conditions il peut y avoir volatilisation d'une partie du soufre

avant que la réaction oxydante n'ait commencé. L'échantillon indiqué plus haut ne nous a donné ainsi que 1,68 p. 100 de soufre au lieu de 1,91.

La meilleure manière d'appliquer ce procédé nous parait être la suivante : on prend un gramme de combustible porphyrisé et 10 grammes de potasse pure, on les place ensemble dans une capsule d'argent et on chauffe lentement celle-ci au bain de sable jusqu'à ce que l'expulsion de l'eau soit complète. On y ajoute alors du nitre par petites quantités ; l'attaque commence avant le rouge sombre et se traduit par un boursouflement très vif. Lorsque l'addition de nouvelles quantités de nitre ne produit plus qu'un boursouflement peu marqué, on place la capsule sur un bec de Bunsen de forme annulaire et on la porte au rouge, aprés avoir ajouté un excès de nitre. Il se produit une légère déflagration, qui n'est pas assez vive pour amener des projections sensibles ; on amène à l'état de fusion tranquille, on laisse refroidir, on traite par l'eau et on précipite le sulfate de baryte comme à l'ordinaire.

Le procédé, ainsi appliqué, n'est ni long ni difficile, mais il nécessite cependant quelques précautions pour éviter le boursouflement et les projections. Il présente en outre, au point de vue de l'exactitude, les inconvénients inhérents à l'emploi d'un excès considérable de réactifs qu'il est difficile d'obtenir bien exempts de sulfates et d'amener à précipiter le sulfate de baryte en présence d'un grand excès d'alcalis, ce qui est une cause inévitable d'erreur par excès, quelque soin qu'on mette à effectuer la purification du précipité. C'est pourquoi nous préférons de beaucoup le procédé suivant, indiqué en 1874 par Adalbert Eschka (*Œsterreichische Zeitschrift für Berg und Hüttenwesen*, p. 111).

On pulvérise aussi fin que possible un gramme de combustible, on mélange intimement avec un gramme de magnésie calcinée et 0gr,5 de carbonate de soude pur et bien sec; on chauffe le tout sur une lampe à alcool ou sur un bec Bunsen dans un creuset de platine ouvert et incliné de manière que la partie inférieure seule soit portée au rouge. La combustion dure de trois quarts d'heure à une heure, on l'active en remuant de cinq en cinq minutes environ

avec un fil de platine. Lorsqu'elle est terminée, la matière prend une couleur jaunâtre; on laisse alors refroidir complétement, on ajoute $0^{gr},5$ à 1^{gr} d'azotate d'ammoniaque broyé et on mélange bien intimement avec une baguette de verre. On met le couvercle du creuset et en chauffe de nouveau au rouge pendant cinq à dix minutes. On verse la matière refroidie dans un vase à précipité de 200 centimètres cubes environ et on l'arrose avec de l'eau; on détache ce qui a pu rester adhérent au creuset en versant de l'eau dans celui-ci et en chauffant quelques instants. On réunit les eaux de lavage, d'un volume total de 150^{gr} environ, on filtre, on ajoute un faible excès d'acide chlorhydrique et on fait chauffer à l'ébullition; on ajoute alors du chlorure de baryum en faible excès et on lave rapidement le sulfate de baryte, précipité dans une liqueur qui ne contient que très peu d'alcalis.

L'emploi d'un creuset de platine, indiqué de préférence par Eschka, a l'inconvénient de donner lieu à une attaque très sensible de celui-ci; comme nous avons pu le constater dans un essai fait à blanc, un creuset a perdu ainsi deux centigrammes et les liqueurs contenaient du platine en proportion notable. On évite cet inconvénient en employant un creuset de porcelaine sur lequel le mélange de magnésie et de carbonate de soude n'a pas d'action sensible à la température à laquelle on opère; l'introduction de traces de silice et d'alumine dans les liqueurs ne crée d'ailleurs aucune difficulté au dosage, puisque ces substances sont déjà contenues dans les cendres du combustible. Nous avons en outre constaté que la magnésie retient toujours un peu d'acide sulfurique, quelque soin qu'on mette à la laver; il serait donc plus exact et plus rapide de dissoudre toute la matière dans l'acide chlorhydrique. Nous devons enfin faire observer que d'une part la porphyrisation aussi parfaite que possible de la matière à essayer est une précaution indispensable et que d'autre part, il est prudent d'augmenter notablement les proportions de magnésie et de carbonate de soude lorsque la teneur en soufre est trop élevée. Sous cette réserve, le procédé peut même s'appliquer aux sulfures métalliques; pour étudier les conditions de son emploi nous avons

exécuté une série d'essais en employant d'une part une quantité constante de réactifs, c'est-à-dire 1 gramme de magnésie et 0gr,50 de carbonate de soute, d'autre part des quantités croissantes de sulfure de cuivre, tenant 21,10 p. 100 de soufre, d'après un dosage à l'eau régale. Les résultats ont été les suivants :

Matière employée	0gr,25	0gr,50	1gr
Sulfate de baryte obtenu	0gr,884	0gr,762	1gr,522
Teneur en soufre correspondante	21,16 p. 100	21,00 p. 100	20,97 p. 100

Dans le dernier essai, la proportion du soufre était un peu supérieure à celle qui correspond à la transformation complète en sulfate du carbonate de soude employé, le procédé n'a pas cependant perdu beaucoup de son exactitude et on peut par suite compter sur celle-ci jusqu'à cette limite. Le seul cas où l'application de ce procédé au dosage du soufre contenu dans les sulfures métalliques puisse donner lieu à quelques difficultés est celui ou la matière contient un métal donnant des sulfates insolubles, comme le plomb ; on résoudrait probablement la difficulté en faisant bouillir la matière, après grillage, avec un excès de carbonate de soude, mais le procédé perdrait beaucoup de sa rapidité d'une part et de son exactitude de l'autre puisqu'on serait obligé d'effectuer la précipitation du sulfate de baryte en présence d'une grande quantité d'alcalis.

Avec les combustibles les résultats ont été également très satisfaisants, comme on peut en juger par les exemples suivants :

Charbon de Brittof.

	Nitre et potasse	0gr,50 Procédé Eschka.	0gr50. Pulvérisation imparfaite.
Sulfate de baryte obtenu	0gr,678	0gr,330	0gr,821
Teneur en soufre	9,27 p. 100	9,09 p. 100	8,85 p. 100

Anthracite du Genest (Mayenne).

	1 g. Nitre et Potasse.	1 g. Procédé Eschka.
Sulfate de baryte obtenu . . .	0g,247	0g,248
Teneur en soufre	3,40 p. 100	3,42 p. 100

Anthracite de St.-Pierre-la-Cour.

	1 g. Nitre et Potasse	1 g. pulvérisé un peu gros Procedé Eschka.
Sulfate de baryte obtenu . . .	0g,299	0g,278
Teneur en soufre	4,12 p.100	3,84 p.100

Dans le cas du charbon anthraciteux de Ujbanya, dont il a été question plus haut, le procédé Eschka et l'emploi de la potasse et du chlore ont donné identiquement le même résultat : 0,68 p. 100.

En résumé le procédé Eschka nous parait rendre le dosage du soufre dans les combustibles presque aussi rapide qu'une détermination de teneur en cendres, et cela en donnant des résultats fort exacts. Il pourrait également être appliqué au dosage du soufre dans des sulfures métalliques, qui ne contiendraient ni plomb ni bismuth ; la présence de l'antimoine ne serait pas un obstacle à son application, pourvu qu'on eût soin d'ajouter de l'acide tartrique en effectuant la dissolution dans l'eau et l'acide chlorhydrique.

§ 5. — MINERAIS.

1° *Minerai de fer* brun, lithoïde, assez dur, provenant de Ujbanya, près Orsova (Banat).

Quartz	32,16
Eau hygrométrique	1,10
Perte par calcination	2,72
Sesquioxyde de fer (Fe = 39,86 p. 100)	56,95
Sesquioxyde de manganèse	0,69
Chaux	3,40
Magnésie	1,32
Acide sulfurique (Soufre 0,56)	1,40
Acide phosphorique	néant.
	99,74

Le manganèse a été dosé par une méthode due à Beilstein, consistant à le précipiter sous forme de peroxyde, en présence d'un grand excès d'acide azotique, en projetant dans la liqueur bouillante des cristaux de chlorate de potasse. Le peroxyde précipité entraîne un peu de fer; on le redissout dans une petite quantité d'acide chlorhydrique, on expulse celui-ci par l'ébullition en présence d'un excès d'acide azotique, et on recommence la précipitation par le chlorate de potasse.

2° *Or natif*, provenant probablement d'Haïti.

Or	84,87
Argent	11,44
Cuivre	1,99
Fer	1,47
Quartz avec quelques grains noirs microscopiques	0,05
	99,82

Cette matière est en poudre fine, offrant au microscope des surfaces arrondies et couvertes de rainures irrégulières; elle est remarquable par la forte proportion de cuivre et de fer qu'elle contient.

L'analyse a été entreprise par la méthode indiquée par Rivot, mais il a été impossible de dissoudre complétement le sulfure d'or dans le sulfhydrate d'ammoniaque. Nous avons dû filtrer à

basse température et séparer ensuite le cuivre et le fer par l'action de l'acide azotique. La séparation a été complète, car l'or coupellé ensuite n'a donné lieu à aucune coloration cuivreuse de la coupelle.

§ 6. — Divers.

1° *Dosages de cuivre* dans quatre échantillons de laiton envoyés par M. Hesdin, fabricant de tôles de cuivre et laiton, à la forge de l'Aune, près Fresnay-sur-Sarthe.

	N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
Teneur indiquée...........	61 p.100	64 p.100	66 p.100	61 p.100
Teneur trouvée par l'analyse.	60,48	63,11	63,77	59,50

2° *Alun.* — Cinq échantillons d'aluns, qui donnaient des résultats très différents au point de vue de la préparation des tissus, ont été adressés par M. Bouttevin, de Mayet. C'étaient tous des aluns à base de potasse, où l'on n'a dosé que l'acide sulfurique et le fer.

	Acide sulfurique (SO^3)	Fer.	Observations.
N° 1	33,78 p. 100	néant.	Bons résultats.
N° 2	33,84	traces très faibles.	Assez bons résultats.
N° 3	33,16	néant.	Id.
N° 4	33,84	0,02 p. 100	Résultats médiocres.
N° 5	33,86	0,07 p. 100	Tache les tissus.

On voit que les résultats obtenus sont d'autant plus satisfaisants que la quantité de fer est plus faible.

Le laboratoire du Mans a eu en outre à examiner un certain nombre d'échantillons de vins, parmi lesquels un seul contenait

plus de 2 grammes de sulfate de potasse par litre, et un échantillon de cidre où l'on soupçonnait la présence de la litharge. Dans ce dernier, l'action directe de l'acide sulfhydrique n'a donné aucune réaction et il a fallu détruire les matières organiques par l'action de l'acide chlorhydrique et du chlorate de potasse pour arriver à constater la présence de 0gr,0042 de litharge par litre.

III.— LABORATOIRE DE MARSEILLE.

Travaux de M. OPPERMANN, ingénieur des mines.

§ 1er.— Calcaires, Ciments.

1° *Calcaire à chaux hydraulique.* — Envoi de M. Marius Julien, fabricant de chaux à Septèmes (Bouches-du-Rhône), provient des environs de cette localité, quartier dit des Caillols. C'est un calcaire de couleur bleue, homogène, à grains fins, qui donne une excellente chaux hydraulique. La direction des bancs est sensiblement Nord-Sud, avec un pendage de 15° vers l'Est. (Terrain oxfordien inférieur.)

Silice	0,067
Alumine et oxyde de fer	0,070
Chaux	0,470
Perte au feu	0,393
	1,000

2° *Calcaire à ciment.* — Adressé par M. Durbec, provient de la commune de Simiane (Bouches-du-Rhône), quartier de la Bastidonne. Calcaire compact, homogène, à grains fins, d'un gris de fumée foncé, donne un ciment de bonne qualité. Les bancs, d'une

puissance totale de 2^m, sont fortement inclinés vers le Sud et dirigés Est-Ouest. (Terrain jurassique moyen, oolithe ou lias.)

L'exploitation a lieu par galeries souterraines.

Silice	0,178
Alumine	0,128
Chaux	0,272
Perte au feu	0,322
	1,000

3° et 4° *Calcaire à ciment* et *Ciment*. — Envoi de MM. Long frères, fabricants de ciment.

a. Calcaire à ciment, homogène, à cassure pierreuse, coloration gris de fumée foncé, provient de la commune de la Bourine (Bouches-du-Rhône), quartier du Pinchinier. (Terrain à lignite.)

b. Ciment cuit fabriqué avec le calcaire ci-dessus.

	a	*b*
Silice	0,166	0,289
Alumine	0,117	0,215
Chaux	0,398	0,496
Oxyde de fer	traces.	traces.
Perte au feu	0,319	»
	1,000	1,000

5° *Calcaire*. — Échantillon pris au point d'émergence de la source minérale du Roucas-Blanc, à Marseille, laquelle arrive au jour par une anfractuosité ouverte dans un massif calcaire appartenant à l'étage néocomien supérieur.

Ce calcaire est très dur, légèrement saccharoïde et sensiblement pur.

Résidu siliceux	0,009
Chaux	0,532
Magnésie	0,011
Oxyde de fer	traces.
Perte au feu	0,448
	1,000

§ 2. — Combustibles

1° *Houille.* — Charbon d'affleurement de la couche St. Victor concession de la Madeleine (Var). C'est une houille maigre, se débitant assez facilement, sans compacité, noire, terne, terreuse. Le coke est pulvérulent, les cendres gris rougeâtre. Le faible pouvoir calorifique des matières volatiles semble déceler une certaine quantité d'eau d'imprégnation.

Matières volatiles	0,475
Carbone fixe	0,417
Cendres	0,108
	1,000
Pb avec PbO	18,000
Carbone équivalent	0,530
Id. aux matières volatiles	0,113

§ 3. — Minerais.

1° *Cuivre pyriteux.* — Envoi de M. Thomas Versini, provient des environs du village de Marignana (Corse), où le sieur Versini a fait quelques travaux de recherche peu importants. L'échantillon a été pris sur une petite veinule de quelques centimètres d'épaisseur, qui se trouve au milieu d'un amas de pyrite de fer. Le plomb n'a pas été dosé.

Gangue quartzeuse	0,063
Cuivre	0,186
Fer	0,384
Soufre, mat. non dosées	0,367
	1,000

2° et 3° *Cuivre carbonaté vert.* — Ces deux échantillons pro-

viennent de travaux de recherche effectués par M. Hilarion Roux, sur le territoire de la commune du Luc (Var). Ce gisement, situé à la base des grès bigarrés, consiste en un grès silico-calcaire assez fin, imprégné de carbonate vert.

Une demande de concession est en instance.

a. Paraît représenter la teneur moyenne.

b. Minerai pauvre.

	a	b
Gangue quartzeuse	0,725	0,863
Cuivre	0,123	0.033
Fer..	traces.	traces.
Chaux	0,047	0,037
Perte au feu	0,105	0,067
	1,000	1,000

4° et 5° *Galène.* — Envoi de M. Bonnot, à Marseille. Ces deux échantillons proviennent des environs de Néraches, quartier du Carton (Hautes-Alpes), et ont été pris sur un filon qui aurait été autrefois le siége de quelques travaux.

M. Bonnot se propose d'entreprendre quelques recherches sur ce gisement.

C'est une galène à petites facettes, avec traces de blende; la gangue est quartzeuse.

Essai par voie sèche :

	a	b
Plomb p. 100	47	37
Argent aux 100 kilog. de plomb d'œuvre.	90gr.	180gr.

6° *Galène.* — Envoi de M. Amasio, à Marseille. Cet échantillon provient d'un filon traversé par une tranchée du chemin de fer de Graissessac à Bédarieux, sur le territoire de la commune de Complong (Hérault); quelques travaux de recherches vont être entrépris sur ce gisement. C'est une galène cubique, légèrement blendeuse. La gangue est argilo-siliceuse

Essai par voie sèche :

Plomb p. 100.	60
Argent aux 100 kilog. de plomb d'œuvre	151 grammes.

7° *Galène pauvre.* — Galène à petites facettes, à gangue quartzeuse, adressée par M. Garance, à Marseille. Cet échantillon provient des Alpes-Maritimes, commune de St.-Etienne-des-Monts; il a été pris à la partie supérieure d'un filon d'une puissance de 1m10, encaissé dans des gneiss. Ce filon a été l'objet de quelques travaux. On remarquera la richesse exceptionnelle en argent du plomb obtenu.

Essai par voie sèche :

Plomb p. 100.	7
Argent aux 100 kilog. de plomb d'œuvre. . . .	590 grammes.

8° *Blende.* — Envoi de M. Garance, à Marseille. Provient de la commune de St.-Etienne-des-Monts (Alpes-Maritimes). L'échantillon a été pris à la partie supérieure d'un filon de 2m10 de puissance, encaissé dans des gneiss, sur lequel on a effectué certains travaux.

Résidu siliceux.	0,416
Zinc	0,245
Fer	0,041
Cuivre, plomb	traces.
Soufre, matières non dosées	0,298
	1,000

9° *Galène.* — Envoi de M. C. Tian, d'Aden; provient de l'Abyssinie. C'est une galène cubique, sensiblement pure, à l'aspect légèrement blendeux, peu riche en argent. Cet échantillon se présente sous la forme d'un caillou roulé.

Essai par voie sèche.

Plomb p. 100	74,30
Argent aux 100 kilog. de plomb d'œuvre. . . .	29 grammes.

10° à 12° *Cuivres pyriteux.* — Envoi de M. Thomas Versini Ces trois échantillons proviennent d'un gisement rencontré sur le territoire de la commune de Marignana (Corse), gisement sur lequel M. Versini a effectué divers travaux.

a. Pyrite cuivreuse riche.
b. Pyrite cuivreuse avec blende.
c. Pyrite cuivreuse avec blende et galène.

	a	*b*	*c*
Gangue siliceuse	0,205	0,155	0,420
Cuivre	0,234	0,103	0,040
Fer	0,248	0,294	0,217
Zinc	»	0,084	0,118
Plomb	»	»	0,032
Soufre et matières non dosées	0,313	0,364	0,163
	1,000	1,000	1,000
Argent			0,000280

13° *Galène.* — Envoi de MM. Roux de Fraissinet, à Marseille. Provient de travaux effectués en vue d'une demande en concession, sur le territoire de la commune de la Môle (Var). C'est une galène cubique brillante, sensiblement pure, et riche en argent.

Essai par voie sèche :

Plomb p. 100	78,2
Argent aux 100 kilog. du plomb d'œuvre	428 grammes.

14° *Hématite rouge.* — Provient des recherches effectuées par M. Pastoret, au quartier du Bois-des-Blaques, commune de Châteaux-Double, département du Var.

Silice	0,005
Alumine	0,030
Chaux	0,225
Magnésie	0,009
Fer	0,280
Soufre	0,003
Plomb	traces
Perte au feu	0,448
	1,000

§ 4.— Divers.

1° et 2° *Sables*. — Ces sables sont entrés dans la composition d'un mortier utilisé pour des constructions faites à l'usine à plomb de Montredon, banlieue de Marseille. Il s'agissait de rechercher s'ils étaient de nature à pouvoir donner un mortier de bonne qualité. Or, les résultats ci-contre montrent que ces sables sont trop calcaires et trop argileux et ne peuvent donner qu'un mortier médiocre; c'est du reste ce que l'expérience a démontré.

a. Sable nouveau. — *b*. Sable ancien.

a. Renferme probablement un peu de magnésie.

	a	*b*
Sable quartzeux	0,413	0,593
Argile	0,056	0,186
Chaux	0,259	0,112
Perte au feu	0,722	0,109
	1,000	1,000

3° et 4° *Sables*. — Envoi de M. Bernard. Ces échantillons proviennent des environs de Piolenc (Vaucluse). Terrain de grès vert.

a. Sable blanc.

b. Sable grisâtre.

Ces sables contiennent des traces de fer à peine sensibles et pourraient sans doute être utilisés dans l'industrie du verre.

	a	*b*
Sable quartzeux	0,987	0,984
Chaux	0,005	0,004
Perte au feu	0,008	0,012
	1,000	1,000

5° *Boue*. — Envoi de M. Roucayrol, ingénieur des ponts et chaussées à Marseille.

Cette boue a été ramassée sous le pavé de la rue Cannebière, à

Marseille, en un point où elle se forme, paraît-il, assez rapidement après chaque repavage.

Argile	0,058
Sable quartzeux	0,645
$CaO.CO^2$	0,059
$MgO.CO^2$	0,013
Fe^2O^3	0,012
Eau, mat. organiques	0,213
	1,000

6° *Graphite.* — Envoi de M. Grangeon, à Marseille. Provient des Hautes-Alpes, commune de La Pisse. Ce gisement qui a, paraît-il, une certaine importance, aurait été, il y a quelques années, le siége d'une petite exploitation. On en expédiait les produits au Creusot. C'est un graphite très impur, renfermant une forte proportion d'argile siliceuse. Peut-être pourrait-il être utilisé à la fabrication des produits réfractaires; nous ignorons si l'expérience a été faite dans ce sens.

Eau et matières volatiles	0,044
Peroxyde de fer	0,040
Silice et alumine	0,494
Graphite	0,336
Carbone	0,072
Chaux	0,014
	1,000

7° *Asphalte pour chapes de voûtes.* — Envoi de M. Morellet, commandant du génie à Marseille.

Échantillon d'asphalte employé pour les chapes de voûtes de magasins à poudres en construction à l'île du Château-d'If.

Cet échantillon contient une proportion de bitume suffisante.

$CaO.CO^2$	0,502
Argile siliceuse	0,208
Oxyde de fer	traces.
Eau et perte	0,017
Bitume	0,273
	1,000

8° *Gypse.* — Envoi de M. Caseneuve, à Marseille. Provient des Alpes-Maritimes, de la région de Nice. C'est un bel échantillon de gypse blanc, à texture saccharoïde, à peu près pur, pourrait être utilisé pour le moulage. Sa composition en centièmes montre qu'il correspond sensiblement à la formule $CaO.SO^3,2HO$.

SO^3	0,456
CaO	0,332
HO	0,212
	1,000

9° *Argile.* — Argile rouge provenant de la commune de La Seyne, quartier de St.-Jullien (Var).

Envoi de M. Roussel, de Brignoles, qui désirait connaître pour quoi cette matière ne prenait, sous l'action du feu, ni dureté, ni cohésion. On voit sans peine que le défaut de plasticité de cette argile est dû à la trop grande quantité de fer qu'elle contient.

Silice	0,316
Alumine	0,300
Oxyde de fer	0,218
Chaux	traces
Eau	0,118
Matières non dosées et pertes	0,048
	1,000

10° *Matière cristalline.* — Envoi de M. Benoît, ingénieur en chef des mines. Matière cristalline d'un blanc pâle, formant la gangue dans certain minerai de fer alumineux des Baux. Cette substance, qu'on aurait pu prendre, à première vue, pour de l'hydrargilite, est du carbonate de chaux à peu près pur.

Alumine	0,010
Chaux	0,526
Acide carbonique	0,413
Eau	0,051
	1,000

IV. — LABORATOIRE DE PAU.

Travaux de M. GENREAU, ingénieur des mines.

1° *Minerais mélangés (plomb et zinc)* du plateau de Lia.

Les minerais mélangés de plomb et de zinc offrent un grand intérêt dans la région des Pyrénées, où ils se rencontrent très fréquemment, et nous nous sommes proposé d'en étudier un certain nombre provenant de gisements analogues, pour servir à l'étude des exploitations similaires qui commencent à se développer sur le versant français ; dans les mines de Contres, d'Arre et de Bartèque. Cette étude générale a été seulement commencée et nous avons pris pour point de départ les minerais mélangés du plateau de Lia, qui se présentent à peu de distance de la frontière et qui sont remarquables par la teneur en argent des plombs-d'œuvre. Ils nous ont fourni des types assez variés, à comparer ultérieurement avec les produits des autres exploitations situées dans le même étage géologique (terrain silurien).

a. Échantillons variés provenant d'un même filon de minerais mélangés, encaissé entre les schistes et les calcaires siluriens.

	Teneur en plomb par tonne de minerai.	Teneur en argent par tonne de minerai.	Teneur en argent du plomb-d'œuvre.
	p. 100	kil.	kil.
1° Galène à peu près pure, à grandes facettes, en proportion à peu près égales avec de la galène à petits grains, sans apparence sensible de gangue. Essai fait sur 80 grammes.	75	1,066	1,422
2° Galène à grandes facettes, sans gangue apparente, paraissant un peu mélangée de blende, en faibles proportions. Essai sur 10 gr.	73,57	0,900	1,223
3° Galène à grandes facettes, sans gangue apparente, mais pouvant contenir une faible proportion de blende. Essai sur 20 gr.	71,54	1,000	1,397

	Teneur en plomb par tonne de minerai.	Teneur en argent par tonne de minerai.	Teneur en argent du plomb d'œuvre.
	p. 100	kil.	kil.
4° Galène à grandes facettes sans gangue apparente, mais pouvant contenir une faible proportion de blende. Essai sur 20 gr.	70,985	1,000	1,408
5° Galène grenue, à petites facettes, avec quelques grandes lamelles de galène et quelques parties blendeuses apparentes. Essai sur 10 gr.	70	0,950	1,357
6° Galène grenue ou à petites facettes, avec un peu de galène à grandes facettes et quelques noyaux apparents de blende brune peu abondante. Essai sur 10 gr.	68,46	0,600	0,945
7° Galène grenue ou à petites facettes, avec un peu de galène à grandes facettes et quelques noyaux apparents de blende brune peu abondante. Essai sur 20 gr.	56,475	0,550	0,973
8° Galène grenue ou à petites facettes, avec un peu de galène à grandes facettes et quelques noyaux apparents de blende brune peu abondante. Essai sur 10 grammes....................	67,57	0,700	1,036
9° Galène grenue ou à petites facettes, avec un peu de galène à grandes facettes et quelques noyaux apparents de blende brune peu abondante. Essai spécial pour argent, sur 10 grammes....	»	0,600	»

b. Échantillons provenant de l'affleurement d'un filon moins riche, avec gangue de nature siliceuse, également encaissé entre les schistes et les calcaires siluriens.

10° Mélange de galène et de blende, dans une gangue de nature siliceuse. Essai fait sur 10 g.	>40	0,400	»

c. Échantillons provenant d'un filon à gangue siliceuse et de pyrite magnétique, encaissé dans les calcaires siluriens.

11° Échantillon à gangue de nature siliceuse et de pyrite magnétique, avec imprégnation de petites lamelles de galène. Essai fait sur 20 g.	7,62	0,100	1,811
12° Échantillon à gangue de nature siliceuse et de pyrite magnétique, avec imprégnation de petites lamelles de galène. Essai fait sur 10 g.	10,60	0,150	1,415

2° *Cristaux d'albite et calcaires magnésiens* du cirque de Pé-de-Hourat. (Basses-Pyrénées).

La découverte d'un gîte important, et resté inconnu jusqu'à ce jour, de lherzolithe, dans le cirque de Pé-de-Hourat, vers l'entrée de la vallée d'Ossau, a conduit à examiner de près une substance minérale intéressante qui se montre en cristaux transparents et tabulaires, disséminés dans un calcaire cristallin, près du contact de la lherzolithe avec les calcaires jurassiques de cette région.

Les essais effectués au laboratoire ont démontré que ces cristaux n'étaient pas de la baryte sulfatée comme on pouvait le croire tout d'abord, et une analyse partielle de la substance a fait reconnaître qu'elle renfermait les proportions suivantes de silice, d'alumine et de chaux, en dehors de l'alcali dont le dosage n'a pas été fait :

Silice	70,1	p. 100
Alumine	19,5	»
Chaux	1,8	»

Cette analyse partielle a mis sur la trace de la véritable nature de la substance minérale, et après avoir dégagé de la gangue des cristaux très nets, par l'action lente des acides, l'examen de leur forme a fait reconnaître qu'ils appartenaient sûrement au feldspath albite, étant identiques aux cristaux du col de Bonhomme, en Savoie, et offrant, comme ces derniers, une double mâcle et étant également très aplatis suivant g_1.

Un échantillon de ce type intéressant d'albite des Pyrénées a été adressé à l'Ecole des Mines.

Il a été reconnu, une fois la détermination faite, que l'albite avait été déjà rencontré, avec la même forme cristaline, aux environs du village d'Aste, dans la vallée d'Ossau, par M. Des Cloizeaux ; mais ce fait était ignoré lors de la découverte du nouveau gîte de Pé-de-Hourat qui a mis sur la trace d'un fait important au point de vue minéralogique, à savoir la fréquence de l'albite dans les roches ophitiques de la région. Nous avons en effet, depuis, retrouvé cette même substance dans les ophites d'Ogen et d'Arudy, et les échantillons de ce dernier gîte ont démontré, en

outre, le fait non encore constaté jusqu'ici de la pseudomorphose de l'albite en analcime.

Les cristaux de Pé-de-Hourat ont été ainsi le point de départ d'observations successives intéressantes pour l'étude des roches d'ophite des Pyrénées.

Les calcaires jurassiques au milieu desquels perce le gisement de lherzolithe se montrent, à peu de distance, cristallins et noirâtres, avec l'aspect de certaines dolomies. Ils dégagent une odeur fétide sous le choc du marteau et renferment une proportion notable de magnésie. L'analyse qui en a été faite au laboratoire y a fait reconnaître les éléments suivants :

Matière charbonneuse ou bitumineuse.	traces	
Fer et Alumine.	id.	
Chaux.	42,9	p. 100.
Magnésie	9,7	»

V. — LABORATOIRE DE PRIVAS.

Travaux de M. TAUZIN, ingénieur des mines.

1° *Lignite du Banc-Rouge.* — Échantillon pris au voisinage du puits n° 8. Charbon terne, léger, renfermant un grand nombre de petits nodules résineux. Brûle avec une odeur empyreumatique prononcée et en laissant des cendres légèrement rougeâtres. Donne par calcination un résidu noir pulvérulent. Voici les résultats de l'analyse :

Carbone fixe.	36,25
Matières volatiles.	44,75
Cendres.	19,00
	100,00

Plomb avec litharge.	17gr,513
Carbone équivalent	0,5151
Id. aux matières volatiles . .	0,1526

La grande impureté de ce combustible ne paraît donc pas permettre d'espérer (toute autre considération laissée bien entendu de côté) un accroissement notable du chiffre actuel de l'extraction.

2° *Anthracite de Prades.* — Menu pris sur le carreau de la mine et provenant du niveau 110 du puits Chalmeton. Charbon noir et brillant; laisse par calcination un résidu noir pulvérulent. L'analyse a donné :

Carbone fixe.	66,71
Matières volatiles.	11,54
Cendres	21,75
	100,00
Plomb avec litharge	25,235
Carbone équivalent	0,7422
Id. aux matières volatiles . .	0,0751

Les couches de Prades ne s'améliorent donc guère en profondeur, au point de vue de la qualité du combustible. La proportion des cendres paraît cependant beaucoup trop élevée ; l'incinération ayant été faite trois fois, il faut admettre que la prise d'essai, toujours difficile, a laissé ici beaucoup à désirer. Cette expérience sera reprise en 1882.

3° *Houille de St.-Etienne*, employée pour la fabrication du gaz d'éclairage à Privas. Cette houille, noire, brillante, à éclat légèrement gras, provient de la couche des Littes. Elle donne un coke argentin très boursouflé. La composition de l'échantillon examiné est la suivante :

Carbone fixe.	60,71
Matières volatiles	32,75
Cendres	6,54
	100,00

Plomb avec litharge	27gr,48
Carbone équivalent	0,8082
Id. aux matières volatiles. . .	0,2011

4° *Graphite.* — Échantillon recueilli dans la commune d'Empurany (Ardèche). La gangue est surtout formée par du mica jaune; on distingue dans la masse certains nodules ferrugineux. L'analyse a donné :

Carbone fixe.	51,57
Matières volatiles	1,83
Cendres.	48,60
	100,00

Les intéressés fondaient de grandes espérances sur les travaux de recherches qu'ils avaient entrepris ; mais une fois la boule de graphite très impur qu'ils avaient découverte à la surface enlevée, il n'a pas été possible de déterminer dans quelle direction se prolongeait le gîte et les travaux ont été abandonnés.

VI. — LABORATOIRE DE RODEZ.

Travaux de M. LAUR, ingénieur en chef des mines (EXTRAIT).

1° *Minerais de plomb* provenant de filons des environs de Bouillac (Aveyron).

a. Galène grenue, gangue quartzeuse, pyrites et blende.
b. Galène massive, gangue de pyrites de fer.

	a	b
Plomb	57	80 p. 100
Argent . .	110 gr.	100 gr. p. 100 k. de minerai.

2° *Calcaire* provenant des carrières de Riplo, près la Canourgue (Lozère), appartenant à M. Abinal, notaire.

L'analyse faite sur un échantillon moyen prélevé à la carrière a donné :

Sable siliceux	8,00
Silice combinée	10,70
Alumine	4,00
Peroxyde de fer	1,70
Chaux	52,00
Magnésie	5,80
Perte au feu, etc	28,30
	100,00

L'indice d'hydraulicité est égal à 0,28 ; c'est celui d'une chaux moyennement hydraulique.



VII. — LABORATOIRE DE L'ÉCOLE DES MINEURS DE SAINT-ÉTIENNE.



Travaux de M. BAROULIER, répétiteur de chimie (Extrait).

1° *Tourbes agglomérées.*

a. Tourbe de Franche-Comté.
b. Tourbe de Fourvoirie.

	a	*b*
Eau hygrométrique à 110°	12 p. 100	12 p. 100
Cendres de couleur blonde	12,10 »	12,50 »
Gaz, par 100 kilog. de tourbe, mesuré sous la pression de 710mill. et à la température 20°	25m3	28m3
Pouvoir calorifique	8790	8647
Le pouvoir calorifique du carbone étant	7815	7815
Poids du mètre cube	689 kilog.	708 kilog.

Les essais ont été faits sur la tourbe desséchée.

2° *Houilles et cokes* de Saint-Laurs (Deux-Sèvres).

1. Houille du puits Ste. Claire, veine 5 sud;
2. Id. id. veine 5 sud, cheminée n° 3;
3. Id. id. veine 6 sud;
4. Id. id. veine 3 nord et veine 8 sud, en poussières mélangées;
5. Houille du puits Ste. Clotilde, veine 5 nord;
6. Id. id. veine 6 sud;
7. Id. id. veine 8 sud;
8. Houille du puits St. Laurent, veine 7 sud (1881);
9. Id. id. veine 6 sud;
10. Coke menu du puits Ste. Clotilde, criblé à 1 centimètre;
11. Id. id. id. à 3 id.

	Matières volatiles.	Coke.	Cendres p. 100	Carbone fixe p. 100	Pouvoir calorifique	Soufre.	Phosphore.
N° 1	20,50	79,50	rouge, blonde et blanche 7,90	71,60	6824	0,224	0,015
N° 2.	22,25	77,75	rouge 5,50	72,25	6639	0,600	faible trace
N° 3.	20,00	80,00	rouge et blanche 8,95	71,05	6737	0,420	0,0125
N° 4.	20,50	79,50	blonde 10,00	69,50	6613	0,500	0,0252
N° 5.	17,00	83,00	blonde et blanche 6,00	77,00	7589	0,210	0,0065
N° 6.	20,00	80,00	jaune clair 10,00	70,00	7291	0,580	traces
N° 7.	17,70	82,30	blonde 8,00	74,30	6572	0,850	traces
N° 8.	24,40	75,60	rouge 5,80	69,80	7511	0,994	0,018
N 9.	20,00	80,00	rouge et blonde 8,50	71,50	7387	0,590	0,012
N° 10.	», »	100,00	blonde 16,00	84,00	6945	0,680	0,018
N° 11	», »	100,00	blond ardent 18,50	81,50	6870	0,600	0,025

Les chiffres du pouvoir calorifique ont été calculés en prenant 7815 calories pour le carbone pur.

A la distillation la houille du puits Ste. Claire, veine 5 sud, cheminée n° 3, a donné fort peu de gaz ; celle du puits St. Laurent, veine 7 sud (1881), en a donné par 100 kilog. 28$^{m.c.}$, 50, sous la pression de 713$^{mill.}$ et à la température de 22° centigrade ; mais ce gaz a un un pouvoir éclairant très faible ; la dite houille ne convient donc que pour gazogènes de la métallurgie.

Les autres houilles sont bonnes pour coke et pour forges.

3° *Terre de Bollène* employée à l'École des Mines de Saint-Étienne :

Perte au feu.	18,00
Silice	54,00
Chaux	2,00
Magnésie.	0,17
Alumine.	29,00
Sesquioxyde de fer	2,00
	100,17

VIII. — LABORATOIRE DE TROYES.

Travaux de M. PESTELARD, garde-mines principal. (EXTRAIT).

1° *Argiles.*

	a	b	c
Sable siliceux	10,50	12,50	12,25
Carbonate de chaux	7,53	»	»
Chaux	»	0,50	»
Oxyde de fer	2,07	»	1,25
Silice	48,50	51,00	51,00
Alumine	22,50	23,00	22,50
Eau combinée et matières organiques.	9,90	13,00	13,00
	100,00	100,00	100,00

a. Argile envoyée par M. Mocqueris, fabricant de tuiles au Mesnil-St-Père.

Cette argile, qui appartient à l'étage du gault, se rencontre entre les marnes et les sables verts du terrain crétacé ; elle est très estimée pour la fabrication des tuiles, briques, tuyaux de drainage, etc.; ses produits ne sont pas réfractaires.

b. Argile réfractaire exploitée à Villy-en-Trodes. Échantillon n° 1, blanc, sans aucune tache d'oxyde de fer.

Le résidu de la calcination reste blanc.

c. Argile de même provenance. Échantillon n° 2, blanc, avec taches jaunâtres.

Le résidu de la calcination est blanc jaunâtre, couleur due à la présence d'une certaine quantité d'oxyde de fer.

Ces argiles (*b*, *c*), qui appartiennent au terrain néocomien, sont très réfractaires quand elles ne renferment pas d'oxyde de fer en quantité notable. On les rencontre le plus ordinairement sur de petits mamelons, où elles existent en couche d'une épaisseur d'environ 0m60. Elles sont recouvertes par des terres argileuses, mélangées de minerai de fer oolithique, et par des couches de sable plus ou moins réfractaire. En relevant une coupe de ce terrain on a trouvé :

	m
Terre végétale argilo-sableuse.	0,50
Terre argileuse mélangée de minerai de fer.	2,50
Sable jaunâtre ferrugineux.	0,50
Sable bigarré gris rougeâtre	0,40
Sable jaunâtre réfractaire.	0,60
Argile blanche réfractaire	0,60

Ces argiles donnent lieu à de nombreuses exploitations ; elles sont spécialement employées à la fabrication des creusets de verrerie, gazettes, etc.

Les échantillons qui renferment une certaine quantité d'oxyde de fer servent à la fabrication des poteries communes et des briques réfractaires ; leur prix de vente varie de 18 fr. à 26 fr. les 1.000 kil., en gare, sur wagon, suivant leur qualité.

2° *Argiles plastiques des terrains tertiaires.*

	a	*b*	*c*	*d*	*e*
Sable quartzeux (par lévigation).	1,00	0,90	4,50	1,00	1,20
Alumine.	25,30	24,50	23 00	54,00	54,30
Silice	56,00	56,10	51,50	24,00	24,00
Magnésie.	1,50	0,90	1,00	0,50	0,50
Oxyde de fer.	»	»	traces.	»	traces.
Eau et matières bitumineuses .	16,20	17,60	20,00	20,50	20,00
	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

a. Argile réfractaire de Montpothier. Echantillon n° 1, argile blanche, onctueuse au toucher.

Cette argile renferme une certaine quantité de sable quartzeux très fin qui n'a pû être complétement séparé par lévigation.

Le résidu de la calcination est parfaitement blanc.

b. Argile de Montpothier. Échantillon n° 2, couche inférieure de teinte grise violacée ; même gisement que le n° qui précède.

Le résidu de la calcination est blanc grisâtre.

c. Argile de Sézanne (Marne), gris foncé.

Le résidu de la calcination est blanc avec une légère teinte jaunâtre.

d. Argile de Germaine (Marne), couche inférieure grise violacée, presque noire.

Le résidu de la calcination est blanc grisâtre.

e. Argile de Mutigny (Marne), couche inférieure, teinte grise foncée.

Le résidu est blanc avec teinte jaunâtre.

Les argiles plastiques des terrains tertiaires (*a*, *b*, *c*, *d*, *e*), analysées ci-dessus ont sensiblement la même composition ; leur couleur varie du blanc au gris foncé violacé, suivant la quantité et la nature des matières bitumineuses qu'elles renferment.

Elles contiennent un peu de magnésie, mais pas de chaux ni d'oxydes de fer, dont on ne trouve que des traces. Aussi le résultat

de la calcination reste-t-il constamment blanc, avec de très faibles nuances grises ou jaunâtres.

Le peu de sable quartzeux qu'elles renferment est très fin et il est impossible de le séparer complétement par lévigation.

Voici une coupe du terrain qui surmonte ces argiles dans une importante exploitation qui a lieu à Montpothier.

	m
Terre végétale argilo-sableuse	0,50
Terre argileuse	2,00
Grès.	1,00
Argile blanche réfractaire	2,50
Argile brune réfractaire.	2,00

Au-dessous de ces couches on rencontré des sables et des argiles non réfractaires.

Les argiles réfractaires des terrains tertiaires sont employées à la fabrication des gazettes, creusets, etc.

IX.—LABORATOIRE D'ALGER.

Travaux de M. TINGRY, garde-mines (EXTRAIT).

§ I. — MINERAIS.

1° à 3° *Galène*. — Échantillons provenant des mines de zinc, plomb et métaux connexes de R'arbou, déposés par M. Fassin.

	Plomb p. 100.
a.	65,50
b..	57,88
c.	72,30
d. (Échantillon moyen)	65,56

	Argent à la tonne de plomb.
a.	1k,209
d.	1k,898

4° *Cuivre gris*, de la même provenance.

Teneur en cuivre	18,85 p. 100
Argent par tonne de cuivre . .	5k,858

5° *Galène blendeuse*; de la même provenance.

Sulfure de zinc	67,32
Id. de plomb	16,28
Peroxyde de fer	3,27
Carbonate de chaux } Id. de magnésie. }	2,52
Silice	8,65
Cuivre	traces
Argent	0,12
Pertes	1,84
Total	100,00

Ce qui donne comme résultat, pour les métaux :

Zinc métallique	44,52
Plomb	14,13
Argent à la tonne de plomb	0k,850
Id. id. de minerai.	0k,121

6° à 8° *Galène argentifère*. — Échantillons provenant de l'Arbatach, déposés par M. Fassin.

a. Galène à facettes.
b. Galène à grains.
c. Galène à petits grains.

La gangue est quartzeuse.

	Plomb p. 100	Argent à la tonne de plomb.
		kil.
a.	89,30	1,808
b.	42,17	1,431
c.	45,75	1,673

9° *Galène blendeuse*. — Echantillon provenant de Sidi Dayen, déposé par M. Fassin. Gangue quartzeuze.

Zinc	31,15
Plomb	14,00
Mercure	0,22
Gangues	32,00
Soufre	22,63
	100,00

10° à 13° *Galène*. — Échantillons provenant des recherches faites par M. Pillet aux environs de Tizi Ouzou.

a,b. Galène à facettes, mélangée d'oxyde de fer.

c,d. Galène à grains, mélangée de baryte.

	Plomb p. 100.	Argent à la tonne de plomb.
		kil.
a.	34,50	1,885
b.	41,00	1,982
c.	29,75	1,005
d.	24,22	0,979

14° *Galène blendeuse*, de la même provenance.

Plomb p. 100	31,00
Zinc p. 100.	19,75
Argent.	impondérable

15° *Cuivre gris*, de la même provenance, mélangé de morceaux de malachite, avec petites géodes d'azurite, et beaucoup de pyrite.

Cuivre p. 100	17,34
Argent à le tonne de métal	0k,225

16° *Grès schistoïde*, de la même provenance, contenant un

mélange d'oxyde de fer et de manganèse, analysé pour manganèse.

Manganèse p. 100	8,85

17° *Roche* de la même provenance.

Peroxyde de fer	62,480
Id. de manganèse.	3,218
Sulfate de zinc.	18,484
Silice	18,316
Pertes.	3,502
	100,000

D'où l'on déduit :

Fer.	44,00 p. 100
Zinc	9,05 »
Manganèse	2,25 »

18° *Galène* des environs de Saïda, département d'Oran. — Échantillon remis par M. Delage, professeur de minéralogie à l'École supérieure des sciences à Alger.

Plomb, p. 100	43,00
Argent à la tonne de plomb	5^k,800

Cette galerie est à grandes facettes et à gangue d'oxyde de fer.

19° et 20° *Galène.* — Échantillons provenant de Taghmount à 20 k. Ouest de Médéah, remis par MM. Wilson et Kanoui.

Échantillon N° 1.

Teneur en plomb	31,12 p. 100
Argent	Résultat impondérable.

Échantillon N° 2.

Teneur en plomb	59,09 p. 100
Argent à la tonne de plomb.	1^k,390
Soit par tonne de minerai.	0^k,7;0

21° *Galène* de la mine de Sakamody.

Culot de plomb avec 40 gr. de minerai	19,430
Bouton d'argent avec 10 gr. de plomb	0,0'
Zinc, présence constatée, mais en quantité non dosée.	
Mercure	pas de traces.
Gangue ocreuse.	

Ce qui donne :

Plomb p. 100.	49,825
Argent à la tonne de plomb..	1k,00

22° *Minerai de fer* provenant de la concession de l'Oued Messelmoun, recherches faites dans de nouvelles directions, et remis au laboratoire par M. l'ingénieur de l'exploitation.

	a	*b*
Fer, p. 100..	52,00	49,60
Manganèse, p. 100. . . .	3,45	3,80

§ 2. — Combustibles.

Lignite. — Échantillon provenant des environs de Dellys, remis par M. l'Ingénieur en chef des ponts et chaussées.

Ce lignite est fortement imprégné de pyrites, la cassure est terne, la texture lamellaire, il se présente en petits fragments.

Carbone	48,16
Matières volatiles	14,42
Cendres	36,14
Pertes.	1,28
	100,00
Pouvoir calorifique.	5789

§ 3. — Eaux.

	1	2	3	4	5	6	7
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
Acide carbonique	0,121	0,132	0,162	0,160	0,266	0,284	0,255
Id. sulfurique	0,107	0,192	0,144	0,150	0,153	0,161	0,129
Id. sulfhydrique	»	»	0,000464	»	»	»	»
Id. chlorhydrique	0,229	0,166	0,251	0,127	0,297	0,365	0,218
Id. silicique	0,008	0,008	0,011	0,007	0,002	0,005	0,004
Id. nitrique	»	»	»	»	»	»	»
Id. phosphorique	»	»	»	»	»	»	»
Chaux	0,149	0,172	0,189	0,225	0,271	0,407	0,270
Magnésie	0,084	0,094	0,125	0,074	0,127	0,049	0,165
Soude et potasse	0,157	0,142	0,154	0,157	0,258	[illegible]	0,106
Oxyde de fer et alumine	0,005	0,007	0,002	0,011	0,008	0,013	»
Matières organiques	»	»	traces	»	»	0,007	»
Degré hydrotimétrique	31°,7	38°	42°	38°	59°	57°,5	41°
Poids des sels par litres (trouvé directement par évaporation à sec)	gr. 0,864	gr. 0,920	gr. 1,052	gr. 1,000	gr. 1,450	gr. 1,685	gr. 1,210
Composition probable des Sels							
Carbonate de chaux	0,188	0,203	0,241	0,292	0,362	0,526	0,397
Id. de magnésie	0,079	0,082	0,108	0,052	0,206	0,102	0,153
Id. de soude	»	»	»	»	»	»	»
Sulfate de chaux	0,112	0,142	0,182	0,104	0,187	0,238	0,115
Id. de magnésie	[illegible]	0,168	0,100	0,097	[illegible]	»	[illegible]
Id. de soude	»	»	»	0,113	»	»	»
Chlorure de sodium	0,341	0,308	0,335	0,235	0,550	0,675	0,403
Id. de magnésium	0,070	»	0,109	»	»	»	»
Id. de calcium	»	»	»	»	»	»	»
Oxyde de fer et alumine	0,005	0,007	0,002	0,011	0,008	0,013	0,010
Silice	0,008	0,008	0,011	0,007	0,002	0,005	0,004
Nitrates	»	»	»	»	»	»	»
Sulfures	»	»	traces marq.	»	»	»	»
Matières organiques	»	»	traces	»	»	0,007	»
Pertes	0,004	0,007	0,014	0,089	0,073	0,084	0,085
Total	0,864	0,920	1,052	1,000	1,450	1,685	1,210

Eaux (*Suite*).

	8	9	10	11	12	13	14
	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.	gr.
Acide carbonique	0,026	0,075	0,053	0,018	0,031	0,025	0,038
Id. sulfurique	0,051	0,120	0,300	0,640	0,689	0,030	0,026
Id. sulfhydrique	»	»	»	»	»	»	»
Id. chlorhydrique	0,083	0,640	0,690	0,405	0,378	0,080	0,027
Id. silicique	0,002	0,011	0,022	0,004	0,009	0,002	0,008
Id. nitrique	»	»	»	»	»	»	»
Id. phosphorique	»	»	»	»	»	»	»
Chaux	0,041	0,116	0,206	0,306	0,275	0,040	0,033
Magnésie	0,021	0,109	0,050	0,121	0,142	0,008	0,025
Soude et potasse	0,071	0,452	0,520	0,345	0,380	0,070	0,023
Oxyde de fer et alumine	0,013	0,010	0,007	0,010	0,018	0,007	0,006
Matières organiques	traces très faibles	0,062	traces	»	»	0,020	0,065
Degré hydrotimétrique	27°,2	48°	54°	44°	44°	16°	17°
Poids des sels par litre (trouvé directement par évaporation à sec.)	gr. 0,320	gr. 1,598	gr. 1,825	gr. 1,880	gr. 1,960	gr. 0,300	gr. 0,275
COMPOSITION PROBABLE DES SELS							
Carbonate de chaux	0,039	0,128	0,088	0,042	0,057	0,049	0,041
Id. de magnésie	0,018	0,037	0,027	»	0,011	0,005	0,037
Id. de soude	»	»	»	»	»	»	»
Sulfate de chaux	0,047	0,108	0,383	0,687	0,588	0,032	0,029
Id. de magnésie	0,065	0,085	0,112	0,356	0,499	0,017	0,015
Id. de soude	»	»	»	»	0,132	»	»
Chlorure de sodium	0,154	0,983	1,150	0,750	0,700	0,150	0,050
Id. de magnésium	»	0,171	»	»	»	»	»
Id. de calcium	»	»	»	»	»	»	»
Oxyde de fer et alumine	0,013	0,010	0,007	0,010	0,018	0,007	0,006
Silice	0,002	0,011	0,022	0,004	0,009	0,002	0,008
Nitrates	»	»	»	»	»	»	»
Sulfures	»	»	»	»	»	»	»
Matières organiques	traces	0,062	traces	»	»	0,020	0,065
Pertes	0,012	0,003	0,036	0,031	0,043	0,018	0,029
Total	0,320	1,598	1,825	1,880	1,960	0,300	0,275

1° à 3° Eaux du Djendel, remises par l'administration des ponts et chaussées. Service de la colonisation.

Ces eaux proviennent de puits creusés pour l'installation d'un nouveau centre de colonisation et doivent être utilisées pour les besoins domestiques.

N° 1. — Puits d'Aïn Sidi ben Chabi.
N° 2. — Aïn Nackla.
N° 3. — Aïn el Hamra.

4° à 7° Eaux de l'Oued Zeboudja.

Analyse demandée par l'administration des ponts et chaussées pour le service de la colonisation.

8° Eau des environs d'Alger.

Cette eau provient de sources découvertes dans les environs d'Alger, sur le territoire d'El-Biar.

L'analyse a été demandée au service des mines afin de compléter les études faites pour l'alimentation de la ville d'Alger en eaux potables. Le dépôt au laboratoire en a été fait par M. Beudon, conseiller municipal, membre de la commission des travaux.

9° Eau provenant d'une source trouvée dans la propriété Cardaire à Alger, quartier Rovigo, et proposée pour l'alimentation.

L'analyse de cette eau a été demandée par le service des eaux. Pour répondre à son désir on a fait d'abord une analyse sommaire, qui a donné :

	gr.
Poids des sels par litre	1,580
Carbonate de chaux, magnésie. / Sulfate de chaux, magnésie	0,365
Chlorures	1,162
Matières organiques	0,060

L'analyse complète a donné les résultats consignés à la colonne 9 du tableau.

10° Eau de Fedjana.

L'Administration de la commune mixte de Cherchell a envoyé au laboratoire un échantillon d'eau provenant de Fedjana, tribu des Beni Menasser, pour être analysée.

Cette eau est destinée à l'alimentation de deux fermes créées dans le périmètre de la tribu.

La ferme dans laquelle se trouve le puits qui à fourni cet échantillon est la ferme Gobillon.

11° à 14° Eaux provenant du pont du Caïd et du Camp des Chênes et remis au laboratoire par le service des ponts et chaussées. Service de la colonisation.

N° 11. — Pont du Caïd. Eau du puits du lavoir.
N° 12. — Pont du Caïd. Eau du puits de l'abreuvoir.
N° 13. — Camp des Chênes. Source N° 1.
N° 14. — Camp des Chênes. Source N° 2.

X. — LABORATOIRE DE CONSTANTINE.

Travaux de M. PONCELET, garde-mines (*années* 1879-1880) et de M. POULET, garde-mines (*année* 1881.) (EXTRAIT).

§ 1er. — MINERAIS.

1° *Galène et Blende* provenant de Zemmour; échantillon remis par M. Virot, de Philippeville; gangue quartzeuse et ferrugineuse :

Teneur en plomb.	29,7 p. 100.
Argent, par tonne de plomb d'œuvre	2k,778

2° *Galène* pure ou cuivreuse, provenant de la tribu des Beni-Segoual; échantillons remis par M. Deutsch, agent secondaire à Bône.

a. Galène pure à facettes irrégulières.

Argent, par tonne de minerai . . . . 400gr.

b. Galène cubique pure.

Argent, par tonne de minerai. 1k,900

c. Pyrite cuivreuse avec 5 p. 100 environ de galène cubique ci-dessus.

Teneur en argent, par tonne de minerai à 5 p. 100 de galène 740gr. correspondant à 678gr. par tonne de pyrite cuivreuse pure.

Soit par tonne de cuivre 2k,260 pour un rendement en cuivre de 30 p. 100, ou 2k,712 pour un rendement de 25 p. 100.

3° *Galènes et Cuivres gris*. — Échantillons remis par M. Dumesgnil, de Bougie.

a. Galène à larges facettes cubiques des Beni-Ismaïl.

Teneur en argent : 750gr. par tonne de minerai pur, ou 882gr,35 par tonne de plomb d'œuvre.

b. Galène à larges facettes cubiques des Beni-Amrous.

Teneur en argent : 650gr. par tonne de minerai pur, ou 764gr,50 par tonne de plomb d'œuvre.

c. Galène mal cristallisée et mélangée de blende des Beni-Amrous.

Un essai fait sur la galène pure a donné :

Teneur en argent : 400gr. par tonne de minerai pur, ou 470gr,58 par tonne de plomb d'œuvre.

Un second essai a été fait sur le mélange de galène et de blende et a donné :

Teneur en argent : 450gr. par tonne de minerai, ou 650gr. par tonne de plomb d'œuvre.

Un essai du même par scorification a donné :

Teneur en argent : 484gr. par tonne de minerai.

d. Cuivre gris de Tulus (Babor).

L'essai a été fait pour cuivre et pour argent.

L'échantillon renferme de l'antimoine.

Cuivre	32,3	p. 100
Argent	0,1368	p. 100

soit 1k,368 par tonne de minerai pur, ou 4k,235 par tonne de cuivre.

e. Cuivre gris de Aït-Abbès (Tahamoul).

L'échantillon contient de l'arsenic.

Cuivre	34	p. 100
Argent	0,166	p. 100

soit 1k,668 par tonne de minerai pur, ou 4k,905 par tonne de cuivre.

f. Cuivre gris de Tala-N'zaun (Babor).

L'échantillon contient de l'antimoine.

Cuivre	37,6	p. 100
Argent	0,346	p. 100

soit 3k,460 par tonne de minerai pur, ou 9k,202 par tonne de cuivre.

4° *Galène*. — Deux échantillons, remis par M. Estignard.

a. Galène à facettes cubiques des Beni-Momoum.

Argent : 0,0255 p. 100, soit 255gr. par tonne de minerai pur.

b. Galène à petits cristaux brillants des Beni-Chabana.

Argent : 0,0302 p. 100, soit 302gr. par tonne de minerai pur.

5° *Galène et Blende.* — Deux échantillons remis par M. Chabassières et provenant du Djebel-Bekal.

Essai pour argent et pour or.

a. Paraît être un mélange de galène, blende et plomb carbonaté, avec gangue carbonatée ferrugineuse.

Teneur en argent : 1k,240 pour une tonne de minerai brut.

b. Mélange de galène et blende, en veine dans une gangue de chaux carbonatée ferrugineuse cristallisée.

Teneur en argent : 0k,660 par tonne de minerai brut.

Les deux boutons traités ensuite pour or ont donné un résultat négatif.

6° *Galène* provenant du versant de l'Oued-Milla et remise par MM. Pouleaud et Fagès, de Djidjelli.

Ce minerai contient environ 5 p. 100 de gangue. Il consiste en galène à grain demi-fin.

Argent, par tonne de minerai : 0k,150 ou, par tonne de plomb d'œuvre, 0k,197 d'argent.

7° *Minerai de plomb.* — Deux échantillons, provenant d'une mine tunisienne appartenant à la Compagnie de Bône-Guelma.

a. Plomb carbonaté mélangé de gangue dans une proportion estimée à vue à 10 p. 100.

Teneur en argent, par tonne de minerai brut, 0k,200, correspondant à 288gr. d'argent par tonne de plomb d'œuvre.

Le bouton trop petit n'a pas permis de chercher l'or.

b. Plomb sulfuré, mélangé de plomb carbonaté et d'un peu d'antimoine sulfuré. Ce minerai brut renferme environ 40 p. 100 de gangue estimée à vue.

Teneur en argent, par tonne de minerai brut, 387gr,5 soit 708gr,12 par tonne de plomb d'œuvre.

Le bouton contenait de l'or, mais en trop petite quantité pour être pesé.

8° *Galène* provenant des Beni-Keltab. L'échantillon contenait environ 5 p. 100 de gangue.

Argent, par tonne de minerai, 400gr, soit, par tonne de plomb d'œuvre 520gr.

9° *Galène* provenant de l'Oued-Oudina, remis par MM. Marmin et Virot. Le minerai est constitué par un mélange de galène avec plomb carbonaté et de la baryte avec un peu d'hydroxyde de fer.

Plomb d'œuvre.	28,9 p. 100
Argent par 1.000k. de minerai.	1k.,6985
Id. 1.000 de plomb d'œuvre	5,875

10° *Cuivre gris* remis par M. Germon. Ce minerai est antimonifère et arsenifère.

Le cuivre a été dosé sur le minerai pur séparé de la gangue à la main. On a obtenu :

Cuivre	35,5 p. 100
On a obtenu un bouton d'argent pesant.	0gr,01844

Teneur en argent, 1k,680 par tonne de minerai pur, ou 4k,704 par tonne de cuivre.

11° *Minerais* provenant de l'Oued-Oudina, remis par M. Teillier, de Philippeville, pour être essayés pour argent.

Les échantillons sont constitués par des hydroxydes de fer et de manganèse avec beaucoup de baryte lamelleuse et renfermant en outre quelque peu de galène. La prise d'essai a été faite sur la partie contenant le moins de baryte.

Teneur en argent . 0,021 p. 100, soit 210gr. par tonne de minerai.

12° *Galène* remise par M. Dominique, et provenant du D. Ichemoul (Batna).

Teneur en argent : 390gr. par tonne de minerai pur.

13° *Calamine* remise par M. Germon, et provenant du Djebel-Bekal. Le minerai présente l'aspect d'une marne fortement imprégnée de calamine.

Teneur en zinc. . . . . 37,4 p. 100

14° *Galène* remise par M. Pasquier, de Bône, et provenant des Aouïed (Oued-Cham). Cette galène est à grains fins mélangée de gangue.

Plomb . . . . 68 p. 100
Argent, par tonne de minerai, 6gr. ; par tonne de plomb d'œuvre, 8gr,82.

15° *Galène* provenant des environs de Djidjelly (au-dessus des Beni-Caïd), remise par M. Andreucci. L'échantillon essayé avait environ 50 p. 100 de gangue barytique, évaluée à vue.

Teneur en plomb . . . . 30 p. 100
Teneur en argent, par tonne de minerai brut, 138gr,90 ou, par tonne de plomb d'œuvre, 463 gr.

16° *Galène* des environs de Djidjelly, remise par M. Bidault. L'échantillon à gangue quartzeuse.

Teneur en plomb	50,5 p. 100
Teneur en argent, par tonne de minerai brut	120gr,0
Id. id. plomb	237gr,6

17° *Galène* remise par M. Terraillon, et provenant de Sidi-Kamber, chez les Ouled-el-Hadj. Cette galène est à larges facettes et présente sur une de ses faces une poussière noire. Il a été fait deux essais, un sur la poussière noire et l'autre sur la galène à larges facettes.

Essai sur la poussière noire : cette poussière noire est de la

galène mêlée à un peu de pyrite de fer et un peu de gangue. Elle donne par la voie sèche :

> 60 p. 100 de plomb d'œuvre et 0,035 d'argent, soit :
> 508gr. d'argent par tonne de plomb d'œuvre, ou
> 350 — — de minerai.

Essai sur la galène à larges facettes :

> Plomb d'œuvre, 72,7 p. 100 et argent, 0,020, soit :
> 275gr. d'argent à la tonne de plomb d'œuvre, ou
> 200 — — de minerai.

18° *Minerai de fer* provenant du Djebel-Lesoud, près d'Aïn-Beida, déclaration Roussel. L'échantillon remis est en deux petits bancs; le premier banc est une hématite brune et le second une hématite rouge. Il a été fait une analyse sur chacune de ces hématites.

a. Hématite rouge à 60,2 p. 100 de fer,
b. Hématite brune à 55,1 p. 100 de fer.

	a	*b*
Peroxyde de fer avec traces de protoxyde	0,860	0,788
Alumine	0,012	0,015
Protoxyde de manganèse	0,026	0,[illegible]
Soufre	0,059	0,[illegible]
Silice	0,0017	0,0016
Perte au feu	0,0405	0,[illegible]
Phosphore	néant.	néant.
Total	1,0092	1,0061

19° *Minerais divers* remis à l'appui d'une demande de concession faite par M. Terraillon. Mines de Bir-Beni-Salah.

a. Filon Cave. — Galène en concrétions sur du sulfate de baryte. Ces concrétions contiennent soit une poussière noire, soit un mélange de pyrite de fer et de galène.

Le sulfate de baryte qui forme la gangue ne renferme que de rares mouches de galène qui ne pourraient être utilisées que séparées de la gangue par une préparation mécanique.

Il n'a été fait d'essai pour argent que sur les concrétions séparées au marteau de la gangue.

L'essai a donné :

25,47 p. 100 de plomb d'œuvre très aigre et 0,879 d'argent, soit :

Argent, par tonne de minerai.		3k,790
—	— plomb d'œuvre. .	14, 880

Le bouton d'argent n'a donné que des traces d'or non dosables

b. Filon Cave (pauvre). — Échantillon contenant toute la partie minéralisée du filon. La minéralisation se compose de fer carbonaté, sulfate de baryte, silice, blende et galène. La galène étant en très petite quantité, il n'a pas été fait d'essai pour plomb d'œuvre.

Teneur d'argent à la tonne de minerai . . 128gr.

c. Filon Cave (fond du puits). — Échantillon contenant sulfate de baryte, blende blonde et galène disséminée dans la masse.

Teneur d'argent à la tonne de minerai. . 124gr.

d. Filon Poulet, croiseur ferrugineux. — Ce minerai est un hydroxyde ferrugineux avec traces de carbonate de fer et de carbonate de plomb.

Teneur d'argent à la tonne de minerai . . 47gr.

e. Filon Roti, l'une des veines accessoires, 0m,20 d'épaisseur. — L'échantillon est un morceau de remplissage du filon, il se compose d'hydroxyde ferrugineux, de sulfate de baryte et de galène à petites facettes.

Teneur d'argent à la tonne de plomb . .		8k,880
—	— de minerai .	1k,000

f. Filon Poivre (1er niveau). — Échantillon entièrement composé de blende avec quelques mouches de cinabre.

Teneur en mercure . . . . 11,7 p. 100

g. Filon Poivre (1er niveau). — Cinabre.

Teneur en mercure du minerai : 86,2 p. 100

Cinabre.	0,422
Gangues	0,217
	0.639

Les 0gr,361 restant se composent de sulfures de plomb, de cuivre ou de zinc.

L'essai de ce cinabre pour or et pour argent a donné les teneurs suivantes :

Par tonne de minerai non grillé. .	Or . . .	1gr.
	Argent.	68
Par tonne de minerai grillé . . .	Or . . .	3gr,780
	Argent .	254,20

h. Filon Sardine (parties riches). — Cet échantillon est du carbonate de plomb disséminé dans une gangue ferrugineuse.

Rendement en plomb du minerai . . . 58,1 p. 100

Teneur en argent à la tonne de plomb d'œuvre . . . 2k,857

— — minerai.. . . . . 1, 660

20° *Minerai* pyriteux avec or et argent, remis par M. Belaubre, de Bissy, à M. le Préfet de Constantine. Ces échantillons présentent deux types de minerai.

a. Un minerai de fer contenant une forte proportion de pyrite.

b. Une roche blanche contenant de petits cristaux de pyrite disséminés dans la masse.

Ces deux types de minerai n'ont aucune valeur comme minerai de fer, à cause de la quantité de pyrite contenue.

Les essais faits sur ces deux types de minerai ont montré qu'ils ne contenaient pas de quantité appréciable de plomb, cuivre et zinc. Le second type est légèrement arsenical.

Il a été fait sur chacun des deux types de minerais un essai pour métaux fins.

a.	Or et argent		40gr. à la tonne.
	Or	environ	10gr. à la tonne.
b.	Or et argent		38gr. à la tonne.
	Or	environ	5gr. à la tonne.

Le premier type paraît évidemment contenir plus d'or que le deuxième.

La coupelle ayant servi à l'essai du deuxième type semblait indiquer, par sa couleur grise, la présence de l'antimoine, mais un essai spécial, fait sur ce minerai, a montré qu'il ne contenait pas d'antimoine et qu'il était un peu arsenical.

21° *Minerais de zinc* remis par M. Germon.

Deux grammes ont été attaqués par l'acide chlorhydrique et un peu d'acide nitrique. La liqueur d'attaque a été étendue, puis neutralisée par le carbonate d'ammoniaque.

Le fer a été précipité à l'ébullition par l'acétate de soude.

Dans la liqueur séparée du fer par filtration et étendue à un litre et rendue ammoniacale, on a dosé le zinc à l'aide d'une liqueur titrée de monosulfure de sodium. Cette méthode suppose que le fer n'est pas accompagné de manganèse.

Ces minerais contiennent en effet excessivement peu de manganèse, à l'exception du n° 6, ce qui explique la différence entre la teneur en zinc trouvée et celle calculée de ce minerai non calciné.

Nos des minerais	Pertes au feu.	TENEUR EN ZINC				OBSERVATIONS MINÉRALOGIQUES.
		Minerais non calcinés		Minerais calcinés		
		trouvée.	calculée	trouvée.	calculée	
	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	p. 100	
1	23,4	25,5	25,5	33,8	»	*Calcaire siliceux*. Zinc non apparent.
2	27,7	37,2	37,5	52,0	»	*Minerai caverneux* composé de fer hydroxydé et calcaire siliceux ; cassure à éclat gras dû au zinc carbonaté ....
5	28,9	21,9	22,1	31,2	»	*Minerai terreux* composé de calcaire siliceux et ferrugineux. Zinc non apparent ....
6	18,5	5,4	3,3	4,1	»	*Minerai rubané*. Fer hydroxydé et silice. Zinc non apparent..........
12	30,5	44,2	»	»	63,5	*Minerai rognonné*. Pâte de calcaire siliceux et fer hydroxydé. Rognons de zinc silicaté ....
17	32,6	»	18,1	27,0	»	*Minerai terreux*. Pâte de calcaire siliceux et fer hydroxydé. Petits cristaux mal déterminés, probablement de zinc carbonaté................
18	20,9	22,2	32,0	46,4	»	*Minerai rognonné*. Pâte de calcaire siliceux et fer hydroxydé. Cassure à éclat gras dû au zinc carbonaté ....
20	18,75	15,9	15,6	19,3	»	*Minerai caverneux*. Pâte de fer hydroxydé et calcaire siliceux. Cassure à éclat gras. Petits cristaux dans les cavernes de zinc carbonaté.......
21	24,6	»	27,6	36,7	»	*Minerai rognonné*. Pâte de fer hydroxydé et calcaire. Cassure à éclat gras dû au zinc carbonaté..........
22	22,3	»	23,7	30,6	»	*Minerai rognonné*. Pâte de fer hydroxydé, un peu de calcaire, sulfate de baryte. Zinc non apparent..........

§ 2. — Eaux.

1° Eau de Hammuam Sidi Djeballah El Agari.

L'eau est limpide. Quoique donnée comme ferrugineuse il n'y a été trouvé aucune trace de fer.

	gr.
Résidu fixe par litre	1,020

Acide carbonique combiné	0,400
SO^3	0,0689
Cl	0,3458
Cao	0,0986
Mgo	0,0180
Na	0,2750
K	Néant.
	1,2013

Cette eau est chlorurée sodique faible.

2° Eau de Hammam Sidi Djeballah el Agari (sources dans les ruines).

Cette eau, indiquée comme sulfureuse, ne l'est pas, ou du moins il n'a été constaté aucune odeur ni trouvé trace de soufre au sulfhydromètre.

Résidu fixe par litre... 1g,041

On a dosé :

	gr
Acide carbonique combiné	0,388
Aside sulfurique	0,070
Chlore	0,354
Chaux	0,097
Magnésie	0,018
Sodium	0,278
	1,205

Cette eau est chlorurée sodique faible.

3° Eau minérale de Takitount.

Analyse directe

Acide carbonique libre. . . . . 1gr,100 = 712cc

Acide carbonique combiné 1gr,650

	gr.
Chlore	0,141
Acide sulfurique . . .	0,068
Chaux	0,341
Magnésie	0,095
Sodium.	0,561
Potassium.	traces
Silice	fortes traces
	1,206

à ajouter $\frac{1,650}{2}$ acide carbonique = 0,825 pour les carbonates neutres
et oxygène combiné au sodium = 0,170 dans le bicarbonate de soude.

Total	2,201
Poids du résidu fixe.	2,204
Perte . . .	0,003

Interprétation des résultats directs :

Acide carbonique libre 712cc

	gr.
Bicarbonate de soude.	1,548
Id. de chaux.	0,754
Id. de magnésie	0,304
Sulfate de chaux.	0,115
Chlorure de sodium	0,233

Il n'y a pas été trouvé de fer.

Cette eau doit être classée dans les eaux acidulées bicarbonatées sodiques.

4° Eau minérale remise par M. Dufour (Source gazeuze des Beni-Ismail près l'auberge Mira).

Les deux bouteilles contenant cette eau étaient très mal bouchées, de sorte qu'il a été impossible de doser l'acide carbonique libre. Pour la même raison la composition du résidu fixe de cette eau est douteuse, parce que l'évaporation de l'acide carbonique avait amené une précipitation de carbonate de chaux et de flocons ferrugineux.

Pour un litre d'eau :

	gr.
Acide carbonique combiné	0,800
Chlore	0,061
Acide sulfurique	0,089
Chaux	0,645
Magnésie	0,098
Soude	0,637
Protoxyde de fer (traces d'alumine)	0,084
	2,364
A déduire : 1 équivalent d'oxygène pour équivalent de chlore	13
	2,351
Résidu de l'évaporation d'un litre	2,340
Différence	0,011

Interprétation probable des résultats de l'analyse :

	gr.
Bicarbonate de soude	1,411
Id. de chaux	1,498
Id. de magnésie	0,313
Sulfate de chaux	0,151
Chlorure de sodium	0,100
Fer	Combinaison inconnue.

Cette eau doit être classée dans les eaux acidulées bicarbonatées sodiques et calcaires.

En ne tenant compte dans l'eau minérale ci-dessus que des

éléments principaux, savoir : le bicarbonate de soude et le bicarbonate de chaux, cette eau minérale se rapproche beaucoup de l'eau minérale de Medage (Puy-de-Dôme) qui contient :

Carbonate de soude 1gr,290. Carbonate de chaux 1gr,918.
Carbonate de magnésie 0gr,942.

Cette eau a également de l'analogie avec l'eau d'une des source de Levana (Toscane).

5° Eau de la source des bains de l'Oued Alhmenia (Hammam Grous).

Cette eau est chaude à la source, ce qui explique sans doute l'absence complète de gaz libre, soit acide carbonique, soit acide sulfydrique. La température de l'eau à la source n'a pas été déterminée, ne nous étant pas transporté nous même à la source pour faire la prise d'essai.

Les résultats de l'analyse du résidu fixe sont les suivants pour 1.000 grammes d'eau :

L'eau à 29° centig. a pour densité 1,0009.

	gr.
Acide carbonique combiné	0,180
Acide sulfurique	0,333
Chlore	0,274
Silice	0,012
Protoxyde de fer	0,009
Chaux	0,297
Strontiane	0,006
Magnésie	0,183
Soude	0,165
	1,409
A déduire : 1 équivalent d'oxygène pour 1 équivalent de chlore.	61
	1,348
Residu de l'évaporation d'un litre	1,340
Différence	0,008

Interprétation probable des résultats :

Sulfate de strontiane	0,0106
Id. de chaux	0,5582
Chlorure de calcuim	0,1830
Id. de sodium	0,3115
Carbonate de magnésie	0,2798
Id. de fer	0,0145
Silice	0,0120
Acide carbonique combiné à des bases inconnues	0,0290
	1,3481

Cette eau peut être rangée parmi les eaux sulfatées calciques, mais elle s'éloigne cependant de la plupart des eaux de cette catégorie, par l'absence du sulfate de soude qui accompagne ordinairement le sulfate de chaux.

6° Résidu fixe de l'eau de Rir-el-Arch, station de la Compagnie des chemins de fer de l'Est-Algérien.

Cette eau ne présentait aucune saveur particulière et n'avait pas d'odeur. Elle était limpide.

Résidu fixe par litre : 1gr,277.

Analyse élémentaire du résidu fixe :

	gr.
Silice	0,0278
Chlore	0,0919
Acide sulfurique	0,0380
Acide carbonique combiné	0,4073
Chaux	0,0821
Protoxyde de fer	0,0331
Magnésie	0,0293
Soude et potasse	0,5812
	1,2907
A déduire : 1 équivalent d'oxygène pour 1 équivalent de chlore.	0,0200
	1,2707

Cette eau est une eau potable remarquable par la quantité d'alcalis, probablement à l'état de carbonates, qu'elle contient et

surtout par la proportion de la potasse dans ces alcalis. La potasse n'a pu être dosée, mais elle existe en quantité notable

§ 3. — Divers.

1° *Lignite* provenant de Fedj-Mzala.

Cet échantillon est un beau lignite présentant la texture du bois, il est noir, sa poussière est noire avec une teinte légèrement brunâtre. Il brûle très facilement; chauffé en vase clos, il donne un coke boursouflé et léger.

On a dosé :

Cendres.	5,08 p.100
Humidité	2,00
Carbone fixe..	41,40 (y compris le poids des cendres).
Substances volatiles bitumineuses .	56,60

Ce combustible, qui paraît ne pas contenir de sulfures, serait un très bon combustible qu'on utiliserait avantageusement, s'il est en quantité suffisante.

2° *Schiste bitumineux* provenant des environs de Djidjelly et remis par M. Andreucci.

On a opéré sur 10 grammes de schiste porphyrisé.

A la distillation on a obtenu un poids d'huile bitumineuse de 0gr,090, soit un rendement de 0,9 p. 100.

XI — LABORATOIRE D'ORAN.

Travaux de M. PONCELET, garde-mines. (Extrait).

§ 1er. — Minerais.

1° *Galène* provenant du filon de l'Oued Kseub, mine de Gar Rouban. Deux échantillons rapportés par M. Bails, ingénieur des mines.

a. Fragment massif, détaché du front de taille de la colonne riche de l'étage Puget.

b. Produit de la préparation mécanique (schlich).

L'essai pour argent a donné :

a. $1^{k},815$ d'argent à la tonne de plomb.
b. $0^{k},602$ id. id. id.

La richesse dn morceau massif est exceptionnelle ; celle du schlich représente mieux la teneur moyenne du minerai tout-venant.

2° *Galène argentifère* de Kharba, près Saïda.

Cet échantillon, remis par M. Flinois, provient d'une assise de dolomie plombifère stratifiée dans le terrain oxfordien, sur la rive droite du Chabat Zeboudj. L'essai en a été prescrit, en raison des recherches entreprises sur ce gîte ; il a donné les résultats ci-après :

Teneur en plomb . 28 p. 100.
Teneur en argent. 260 gr. à la tonne de plomb-d'œuvre.

3° *Hématite brune* provenant de Franchetti.

Cet échantillon a été rapporté par M. Bails, ingénieur des mines, du chantier d'une recherche à ciel ouvert faite par M. Lévy, dans le voisinage de Franchetti et de la voie ferrée franco-algérienne. C'est dans l'une des strates des dolomies oxfordiennes que se trouve localisée, par places, cette hématite à gangue exclusivement calcaire.

L'essai pour fer et manganèse a donné :

Teneur en fer p. 100	55,29
Manganèse	Néant.

La richesse en fer est très convenable, malheureusement le gîte ne parait pas continu.

4° *Pyrite de cuivre*, provenant du douar-commune d'Aïn-Sultan,

remise par M. Sgitcowitch ; l'essai de cet échantillon a été prescrit en raison d'une demande en permis de recherche de ces gisements, présentée par cet explorateur, associé à MM. Sartor et Barber, d'Oran.

La teneur en cuivre a été trouvée de 54,5 p. 100.
Le dosage de l'argent a donné un résultat négatif.

§ 2. — Divers.

1° *Bitume* d'Aïn-Zeft.

L'échantillon de bitume provenait de la source d'Aïn-Zeft, comprise dans la demande en concession introduite par la société Gérard, Lévy et consorts.

La distillation a été poussée jusqu'à 270° : jusqu'à 90° dégagement gazeux ; de 90° à 120° formation de vapeurs condensables ; à 130° boursouflement et ébullition ; jusqu'à 200° distillation d'un liquide jaunâtre qui se continue jusqu'à 270°.

Résultats obtenus :

Gaz et vapeur d'eau	8,73
Huile lourde	3,58
Résidu pâteux à 270°	87,69
Total	100,00

2° *Eau salée* d'Aïn-Zeft.

Cette eau sert de véhicule au bitume qui émerge de la dite source. Elle dégage sur place une forte odeur sulfureuse. Toutefois le gaz hydrogène sulfuré s'était évaporé, puisque l'analyse n'en a pas révélé une quantité appréciable.

On a dosé :

	gr.
Chlorure de sodium (au litre)	5,86
Sulfate de chaux (id.)	4,42
Residu fixe (id.)	10,80

3° à 7° *Eau* des puits A de Sidi-Sliman.

Ces échantillons d'eau ont été remis au laboratoire des mines par le service des ponts et chaussées, comme provenant de puits de recherches pour l'alimentation d'un centre de colonisation.

On a déterminé la proportion de chlore, d'acide sulfurique, le résidu fixe au litre, et le degré hydrotimétrique.

Les résultats obtenus ont été les suivants :

Par litre.	*a*	*b*	*c*	*d*
	gr.	gr.	gr.	gr.
Chlore	0,549	0,850	0,240	0,110
Acide sulfurique . . .	0,656	0,204	0,119	0,102
Résidu fixe	2,960	2,540	1,115	0.900
Degré hydrotimétrique..	84°	64°	65°	86°

a. Puits A de Sidi-Sliman.
b. Puits A' de Sidi-Sliman.
c. Puits B de Sidi-Sliman.
d. Puits K de Sidi-Sliman.

Ces analyses ont démontré que l'eau du premier puits n'est guère propre aux usages domestiques ; l'eau du second et du troisième (A' et B) peut, à la rigueur, être utilisée pour ce but ; l'eau du quatrième (K) est de qualité convenable. On rencontre souvent de semblables anomalies dans les nappes superficielles.

RAPPORT

PRÉSENTÉ

AU COMITÉ DE L'EXPLOITATION TECHNIQUE DES CHEMINS DE FER

AU NOM DE LA COMMISSION (*) CHARGÉE D'ÉTUDIER

LES MOYENS DE PRÉVENIR LES COLLISIONS DE TRAINS

OCCASIONNÉES PAR LA RENCONTRE DE PLUSIEURS VOIES

Par M. VICAIRE, ingénieur en chef des mines.

Les collisions auxquelles un train est exposé par le fait de la rencontre de la voie sur laquelle il circule avec d'autres voies, peuvent se produire de deux manières : ou bien le train lui-même est dirigé indûment sur des voies où il rencontre, soit d'autres véhicules, soit des obstacles fixes; ou bien ce sont, au contraire, d'autres

(*) Cette Commission, instituée par suite d'une communication ministérielle du 22 novembre 1882, était composée de : MM. ROUSSELLE, inspecteur général des ponts et chaussées, directeur du contrôle des chemins de fer d'Orléans, *président;* SCHLEMMER, inspecteur général des ponts et chaussées, directeur du contrôle des chemins de fer de Paris à Lyon et à la Méditerranée; SEVÈNE, ingénieur en chef des ponts et chaussées, directeur de la compagnie des chemins de fer d'Orléans; VICAIRE, ingénieur en chef des mines, professeur du cours de chemins de fer à l'École supérieure des mines, *rapporteur*.

Les conclusions du rapport de la Commission ont été adoptées par le Comité de l'exploitation technique dans sa séance du 29 mai 1883 et approuvées par M. le Ministre des travaux publics (*Voir* à la partie administrative, p. 382, la circulaire du 6 août 1883.)

véhicules qui sont amenés par les voies concourantes sur le parcours du train.

Le premier cas peut se présenter toutes les fois que le train franchit des aiguilles qu'il aborde par la pointe. Indépendamment des bifurcations proprement dites, cela se rencontre, soit dans les gares importantes où, pour subvenir à une circulation active et à des services multiples, on est obligé de dédoubler les voies principales et parfois de les entrecroiser, soit dans les gares secondaires, avec certaines dispositions des voies affectées au service des marchandises, soit enfin dans toutes les stations des lignes à voie unique où peuvent s'effectuer des croisements de trains (*).

Le second cas peut se produire dans des circonstances beaucoup plus variées et plus fréquentes. La rencontre des voies latérales avec celle que parcourt le train peut se faire de trois manières : par aiguille, par traversée oblique, par traversée rectangulaire ou d'équerre (**).

La voie latérale qui vient rencontrer la première peut être elle-même une voie principale, comme cela se présente aux bifurcations des lignes à double voie; elle peut être une voie secondaire détachée d'une autre voie principale, comme les liaisons de voies ou les voies de garage qui traversent l'une des voies principales; elle peut enfin n'être qu'une voie de service isolée ou reliée à d'autres voies de service.

Les deux cas que nous venons de distinguer offrent des conditions bien différentes au point de vue de l'enclenchement.

(*) Nous appelons voies principales toutes celles que les trains empruntent dans leur circulation normale; toutes les autres sont des voies accessoires ou voies de service.

(**) Les traversées-jonctions, dont l'emploi commence à se répandre, sont, à la fois, des aiguilles et des traversées. Il y a donc lieu de leur appliquer ce qui sera dit des unes et des autres, et il n'est pas nécessaire d'en traiter séparément.

Dans le premier cas, c'est-à-dire lorsque le train aborde une aiguille en pointe, la sécurité dépend essentiellement de la position de l'aiguille. Par conséquent, l'aiguille elle-même ou son levier de manœuvre doit entrer dans toute combinaison d'enclenchement. Il n'y a pas lieu, en général, d'interdire l'accès de l'aiguille, puisque les diverses voies auxquelles elle conduit doivent pouvoir être utilisées simultanément; par conséquent, les signaux placés sur le tronc unique, c'est-à-dire du côté de la pointe de l'aiguille, doivent rester en dehors de la combinaison, au moins en tant que signaux d'arrêt absolu ; on peut trouver opportun d'y faire entrer des signaux d'arrêt franchissables ou des signaux de ralentissement placés de ce côté, afin que les trains n'arrivent à la pointe de l'aiguille qu'avec une vitesse modérée; encore n'y aura-t-il pas convenance à le faire le plus souvent, puisque l'opportunité de marcher avec prudence est la même de quelque côté que l'aiguille soit tournée.

Y a-t-il lieu de placer des signaux sur les diverses voies auxquelles l'aiguille conduit et de les enclencher avec elle? Sans nier que cela puisse être opportun dans certains cas, remarquons que ces signaux seraient généralement inutiles, puisque l'aiguille, convenablement tournée, suffit à protéger la voie occupée; si les agents pensent à la couvrir par un signal, ils penseront sans plus de difficulté à la couvrir au moyen de l'aiguille, ce qui sera beaucoup plus efficace.

Il résulte de cet examen que ce n'est pas sur des combinaisons d'enclenchement qu'il faut compter, en général, pour éviter les accidents de fausse direction que nous comprenons dans le premier cas (*).

(*) La Commission n'ayant à s'occuper que des moyens de prévenir les collisions de trains, il ne sera pas question, dans ce rapport, du verrouillage des aiguilles en pointe et, en général, des

Il y aurait exception cependant pour les aiguilles qui doivent donner normalement l'une des deux voies à l'exclusion de l'autre, par exemple les aiguilles en pointe des voies de marchandises dans les gares secondaires. Dans ce cas, il est au contraire tout indiqué d'enclencher l'aiguille avec les signaux d'entrée de la gare, afin d'interdire l'accès de celle-ci toutes les fois que l'aiguille est faite pour la voie de marchandises et interrompt la continuité de la voie principale.

Les choses se passent tout autrement pour les accidents que nous avons placés dans le deuxième cas. La disposition de l'appareil situé à la jonction des deux voies est indifférente, au point de vue de l'accident. C'est évident pour les traversées, appareils fixes; pour les aiguilles, il n'est pas moins certain que l'on peut toujours, quelle que soit leur position, amener des véhicules sur le croisement et jusque sur le talon même de l'aiguille, et obstruer ainsi la voie principale. Il n'y a donc pas lieu, dans ce cas, ou du moins il n'est pas nécessaire pour la sécurité, de faire entrer le levier de l'aiguille dans les combinaisons d'enclenchement. Ce qui peut être enclenché utilement avec les signaux de la voie principale, ce sont des appareils placés sur la voie latérale et propres à empêcher les véhicules de cette voie d'arriver jusqu'au croisement.

Ces appareils peuvent être ou des signaux, ou des appareils agissant matériellement sur les véhicules, comme des taquets ou blocs d'arrêt, des plaques tournantes ou des aiguilles. Suivant les cas, il y aura lieu d'employer l'un ou l'autre de ces appareils.

Les signaux ont l'avantage de se placer facilement partout et de n'apporter jamais de gêne dans les manœuvres qui s'effectuent sur les voies de service. Ils ont

---

combinaisons qui ont pour objet, soit de prévenir les déraillements, soit de réaliser de simples convenances de service, alors même qu'elles comporteraient des enclenchements.

l'inconvénient d'engendrer facilement la confusion s'il se multiplient trop; de n'être efficaces que pour des véhicules circulant à très faible vitesse, à cause du peu de développement des voies sur lesquelles ils sont placés; d'être sans action sur les véhicules en dérive; enfin, d'être subordonnés dans leurs effets à l'attention et à l'obéissance des agents.

Les taquets, plaques tournantes ou aiguilles de sécurité donnent évidemment beaucoup plus de garanties, surtout par rapport aux manœuvres faites à bras ou ou à l'aide de chevaux. Les taquets seraient en général impuissants à arrêter un train ou une manœuvre à la machine; mais, même dans ce cas, ils auraient encore l'avantage de laisser au moins une trace matérielle de l'infraction commise. Ce dernier avantage est obtenu avec les signaux, si ceux-ci sont appuyés par des pétards.

Nous pensons qu'il y aurait grand intérêt à recourir à ces appareils, notamment aux aiguilles de sécurité, aux taquets et aux blocs d'arrêt, toutes les fois que c'est matériellement possible. On est bien dans l'usage actuellement de placer des taquets sur les voies aboutissant aux voies principales par des aiguilles; mais jusqu'à présent on ne les a guère enclenchés avec les signaux; en outre, on en trouve rarement sur les traversées rectangulaires, où cependant ils peuvent rendre de grands services. L'un de nous a examiné des appareils de ce genre placés à la gare de Bruxelles-Midi; ils consistent en un simple bloc de bois qui vient se poser sur un des rails ou se retirer par l'action d'un levier placé dans une cabine de signaliste, et enclenché convenablement avec ceux des signaux et aiguilles. Ces blocs tiennent très peu de place et peuvent se loger partout; les agents de la gare de Bruxelles paraissent satisfaits de leur fonctionnement. La Commission pense qu'il y aurait grand intérêt à en développer l'application en France.

En résumé, pour éviter les accidents du deuxième genre, il y aura, en général, intérêt à enclencher les signaux qui couvrent la voie principale avec d'autres appareils placés sur la voie concourante, signaux ou appareils de la voie.

Il convient maintenant d'analyser plus en détail les différents cas qui peuvent se présenter pour arriver à déterminer ceux dans lesquels il conviendrait de rendre l'enclenchement obligatoire.

Nous laissons de côté les catégories suivantes dont l'enclenchement a déjà été prescrit par la circulaire du 2 novembre 1881, à savoir :

1° Aiguilles de bifurcation de deux lignes placées soit en pleine voie, soit dans les gares ;

2° Aiguilles de sortie des gares de formation de train et des gares de triage ;

3° Aiguilles de soudure des sablières ;

4° Aiguilles de soudure des embranchements particuliers.

Pour chacun des cas non compris dans cette énumération, on doit se demander, en premier lieu, si l'enclenchement peut être utile à un degré quelconque, s'il ne peut pas offrir des inconvénients, et entre quels appareils il doit être établi ; cet examen est indépendant de l'importance de la circulation et des manœuvres, du développement de la gare, puisque, suivant une remarque de la lettre ministérielle du 22 novembre 1882, il suffit d'une seule fausse manœuvre pour occasionner un accident. Mais, en second lieu, il y aura à peser, si c'est possible, les avantages et les inconvénients, en tenant compte alors de la nature et de l'importance de la circulation, pour apprécier l'opportunité d'une prescription administrative plus ou moins urgente.

On comprend sans peine qu'il n'est pas facile de prévoir tous les cas possibles. Nous nous efforcerons du moins

d'envisager les choses d'un point de vue assez général pour ne pas faire d'omissions importantes.

I. — LIGNES A DOUBLE VOIE.

1° *Aiguilles en pointe sur les voies principales.* — Nous parlons, bien entendu, d'aiguilles prises en pointe par les trains dans leur circulation normale.

S'il s'agit d'un simple dédoublement des voies principales, sans qu'aucun des rameaux aille rencontrer une autre voie principale (Pl. VI, *fig.* 1), nous avons vu qu'en général il n'y a pas lieu à enclenchement.

Si, au contraire, l'un des rameaux vient rejoindre ou croiser une autre voie principale (*fig.* 2), il conviendra d'enclencher l'aiguille avec un signal placé sur cette dernière voie principale pour couvrir la jonction ou la traversée. De la sorte, l'accès de cette jonction ou traversée ne sera jamais permis que d'un côté à la fois, étant interdit de l'autre, ou par un signal, ou matériellement par l'aiguille.

Si l'aiguille en pointe conduit à une voie de garage ou de service (*fig.* 3), elle devra, ainsi que nous l'avons dit, être faite normalement de manière à maintenir la continuité de la voie principale; il conviendra qu'elle soit enclenchée avec le signal à distance, de manière que l'approche de l'aiguille soit interdite aux trains toutes les fois que cette continuité sera interrompue. En outre, on devra placer sur la voie latérale un signal ou un taquet, ou tout autre moyen d'arrêt, compris aussi dans l'enclenchement. Il est à remarquer que, dans ce cas, un signal placé sur cette voie se présentera à l'opposé d'un signal placé sur la voie principale, et ne pourra être l'objet d'aucune confusion pour les mécaniciens circulant sur cette dernière voie.

L'intérêt d'une combinaison de ce genre est surtout con-

idérable dans les stations où tous les trains ne s'arrêtent pas. On comprend quel accident se produirait si un train passant à toute vitesse rencontrait l'aiguille faite pour la voie latérale.

Dans une gare où la voie principale se dédouble, s'il y a des trains qui passent sans arrêt, les voies principales que ces trains n'empruntent pas peuvent être traitées comme des voies accessoires.

2° *Aiguilles prises en talon formant jonction de plusieurs voies principales* (*fig.* 1). — D'après ce que nous avons dit, il n'y aura pas, en général, intérêt à faire entrer l'aiguille elle-même dans la combinaison d'enclenchement, mais on pourra utilement placer sur les diverses voies des signaux enclenchés entre eux de manière à ne pas permettre la sortie simultanée de plusieurs trains.

Si des trains doivent franchir la station sans s'y arrêter, les signaux des voies principales autres que celles que prennent ces trains pourront être enclenchés avec les signaux à distance qui couvrent la gare, comme il va être dit pour les voies de service.

3° *Aiguilles prises en talon et donnant accès à des voies de service qui ne rencontrent nulle part ailleurs les voies principales* (*fig.* 4 et 5).— C'est le cas ordinaire des voies de garage situées, soit dans les gares, soit en pleine voie, et c'est très souvent celui des voies affectées, dans les gares, au service local.

Dans ce cas, pour empêcher que des véhicules arrivant par ces voies de service viennent encombrer la voie principale sans que celle-ci ait été couverte, on placera sur la voie latérale, soit un signal, comme dans le cas précédent, soit un taquet, soit une aiguille de sécurité conduisant à un cul-de-sac, ces divers appareils étant enclenchés avec le signal de la voie principale.

Pour les signaux d'arrêt ainsi placés sur les voies latérales, il pourra convenir d'employer une disposition particulière, soit comme forme, soit comme couleur, afin que les mécaniciens circulant sur les voies principales ne puissent pas les confondre avec ceux qui s'adressent à eux. Mais c'est là une question controversée, certains ingénieurs préférant n'avoir qu'un seul signe pour indiquer l'arrêt dans tous les cas.

Les taquets seraient insuffisants pour arrêter les trains et pourraient même, dans le cas où un train se mettrait en route sans que les mesures convenables eussent été prises, occasionner un déraillement qui obstruerait la voie principale. On devra donc, pour les voies de garage proprement dites, préférer l'un des autres procédés. Ils conviennent, au contraire, très bien pour les voies affectées au service intérieur des gares, sur lesquelles les manœuvres, en dehors du passage des trains, se font à bras ou avec des chevaux ; lorsqu'un train de passage doit y prendre ou y laisser des wagons, la présence de ce train oblige forcément à couvrir la gare ; c'est contre les manœuvres effectuées en dehors de cette circonstance qu'il faut garantir la circulation des voies principales.

L'aiguille de sécurité, avec un cul-de-sac de longueur suffisante, est sans contredit le procédé le plus efficace, et l'on doit le recommander toutes les fois qu'il est applicable; mais les dispositions locales ne s'y prêtent pas toujours.

L'enclenchement de l'aiguille de sécurité présente cet inconvénient que si un véhicule est refoulé de la voie principale vers cette aiguille sans que celle-ci ait été tournée convenablement, la transmission est cassée. Mais cet accident n'apporte aucun trouble à la circulation sur les voies principales. On peut d'ailleurs le prévenir en faisant manœuvrer par un seul et même levier l'aiguille de la voie principale et celle du cul-de-sac.

L'aiguille de sécurité donne déjà de très grandes garan-

ties, même sans enclenchement, à la condition d'en fixer le contrepoids de manière qu'elle donne normalement la voie en impasse; avec cette disposition, on peut toujours prendre l'aiguille en talon sans inconvénient. Mais il faut soutenir l'aiguille toutes les fois qu'un train sort, et, pour le faire, rien n'oblige matériellement à couvrir au préalable la voie principale.

Pour éviter à la fois ces divers inconvénients, il serait intéressant qu'on expérimentât les dispositions qui ont été proposées pour enclencher les leviers tout en permettant de prendre l'aiguille en talon.

4° *Aiguilles en talon donnant accès à des voies de service qui vont traverser ou rejoindre une autre voie principale* (*fig.* 6 et 7).—Ce cas se présente dans presque toutes les gares. Très souvent la voie du service local des marchandises se raccorde aux deux voies principales par des aiguilles en talon et traverse l'une d'elles obliquement. Il y a en outre les liaisons de voies.

Dans ce cas, il y a un certain intérêt à ce que chacune des aiguilles soit enclenchée avec le signal à distance de la voie sur laquelle elle est située; mais comme un train ou un véhicule ne peut aborder l'aiguille qu'après avoir occupé plus ou moins longtemps cette voie principale, celle-ci a dû être couverte bien avant que l'aiguille intervienne dans la manœuvre; cet enclenchement n'intéresse donc pas beaucoup la sécurité. Ce qui est essentiel, c'est que cette aiguille soit enclenchée avec les signaux de l'autre voie principale. Par là on évitera les accidents parfois terribles qui se produisent lorsqu'un train refoulé sur une de ces aiguilles vient obstruer l'autre voie principale au moment où un train y passe sans arrêt.

Il est clair qu'indépendamment des causes de danger qui naissent sur une des voies principales et vont intéresser l'autre, il y a lieu, comme dans le cas précédent, de pro-

téger l'une et l'autre voie principale contre les manœuvres qui s'effectuent sur la voie accessoire. Ainsi une traversée pourra être protégée très utilement par une voie de sécurité dont l'aiguille sera enclenchée avec les signaux ou au moins pourvue d'un contrepoids fixe (*fig.* 7).

Il est à remarquer que l'enclenchement des aiguilles d'une liaison ne peut gêner en rien le mouvement des trains qui l'empruntent dans le cas d'un service temporaire à voie unique.

En effet, rien n'est modifié en ce qui concerne le mouvement des manœuvres qui empruntent cette liaison et leurs relations avec les trains circulant à voie normale; l'enclenchement assure la sécurité de ces mouvements dans les conditions ordinaires et sans plus gêner le service. Tout ce qu'il y a de changé, c'est, en premier lieu, qu'une des voies est interceptée; s'il y a sur cette voie un signal enclenché, il se trouve annulé; c'est, en second lieu, que, sur l'autre voie, des trains marchent à contre-voie; ceux-là ne rencontrent aucun signal fixe. L'enclenchement devient donc en partie superflu, en partie insuffisant; mais il ne peut apporter aucun obstacle au mouvement des trains.

5° *Traversées d'équerre* (*fig.* 8). — Ces voies, dont l'accès est ordinairement donné par des plaques tournantes, n'ont pas, en général, un développement suffisant pour qu'on puisse y placer utilement un signal; mais on peut protéger la voie principale au moyen d'un taquet ou bloc d'arrêt placé près de celle-ci et qui, par l'effet de l'enclenchement, ne permet le passage de la traversée que lorsque la voie principale est couverte. Dans les gares mêmes où, d'après les conclusions ci-après, il n'y aurait pas lieu d'appliquer l'enclenchement, ces appareils, qui devraient être disposés normalement de manière à interdire la traversée, et qu'il ne serait permis d'écarter qu'au moment même de faire passer un véhicule, pourraient rendre de

grands services. On pourrait même faire en sorte qu'ils reprissent automatiquement leur position normale. A raison du grand nombre de ces traversées qui existent sur les lignes les plus fréquentées et de la gravité des accidents qu'elles peuvent occasionner lorsque les trains les franchissent à toute vitesse, la Commission, sans juger opportun, par les raisons données plus loin, d'en faire l'objet d'une prescription formelle, pense qu'il y aurait un grand intérêt à voir se généraliser l'emploi de ces appareils.

On peut aussi protéger les voies principales par l'enclenchement des plaques tournantes, mais ce procédé paraît moins pratique (*).

Il existe quelques exemples de lignes qui se croisent à niveau en pleine voie.

Il est clair que ces traversées doivent être protégées par des signaux enclenchés entre eux au même titre que les bifurcations, soit d'ailleurs qu'il s'agisse de lignes à voie unique ou de lignes à double voie.

II. — LIGNES A VOIE UNIQUE.

Les lignes à voie unique se dédoublent en général dans les stations pour permettre le croisement des trains (*fig.* 9), et, le plus souvent, chacune des voies dédoublées est affectée exclusivement aux trains circulant dans un sens donné.

(*) Pour que l'enclenchement des plaques soit réellement efficace, il faut que la plaque la plus voisine des voies principales ne présente qu'une seule voie qui sera maintenue parallèle à la voie principale toutes les fois que celle-ci ne sera pas couverte.

Il en résulte cet inconvénient, qu'on est obligé d'intercepter la circulation sur les voies principales même pour une manœuvre qui n'a pas à les traverser, mais qui emprunte la plaque enclenchée.

Dans ce cas, la partie de la gare comprise entre les deux aiguilles de dédoublement rentre exactement dans les conditions d'une ligne à double voie. Toutes les considérations qui précèdent relativement aux lignes à double voie, et qui sont indépendantes de l'importance de la circulation, s'appliquent donc sans modification aux stations à voie unique disposées et exploitées comme il vient d'être dit.

Mais il arrive au contraire que l'une des deux lignes, d'une manière normale ou d'une manière accidentelle, est affectée à la circulation des trains marchant dans les deux sens. Dans ce cas, les aiguilles sont prises par les trains tantôt en pointe et tantôt en talon. On doit donc y appliquer ce que nous avons dit des aiguilles en pointe situées sur les voies principales, et aussi ce qui a été dit des aiguilles en talon.

La même chose doit se dire des voies de garage situées en dehors des aiguilles de dédoublement des gares, et qui sont forcément prises tantôt en pointe et tantôt en talon. C'est surtout pour les trains qui les abordent par la pointe qu'il importe d'éviter les conséquences d'une fausse direction par un enclenchement qui ne permette à un train d'arriver de ce côté par la voie principale que lorsque l'aiguille donne bien la continuité de cette voie.

Quant aux aiguilles de dédoublement elles-mêmes, elles présentent une différence essentielle avec celles qui forment la jonction de plusieurs voies principales dans les gares des lignes à double voie. Celles-ci, en effet, sont abordées de la même manière par tous les trains qui les franchissent, en pointe si elles sont à l'entrée de la station, en talon si elles sont à la sortie, et elles doivent pouvoir donner à volonté l'une ou l'autre direction.

Les aiguilles de dédoublement de voie unique, au contraire, sont prises en pointe par tous les trains marchant dans un certain sens, et en talon par tous les trains marchant dans l'autre sens.

En général, ainsi que nous l'avons dit en commençant, elles doivent donner aux premiers toujours la même direction, qui est alors celle de gauche. C'est à quoi on pourvoit d'une manière très simple par l'emploi d'un contrepoids fixe qui donne invariablement cette direction, sans empêcher la sortie par l'autre voie des trains prenant l'aiguille par le talon. Cette disposition semble donner des garanties suffisantes, au moins lorsqu'on adapte à l'aiguille un appareil qui permet à la gare de s'assurer qu'elle est bien appliquée contre le rail. On ne pourrait alors donner une fausse direction qu'en tenant l'aiguille soulevée pendant tout le passage du train, ce qui suppose une volonté formelle. Avec cela, les mesures de précaution prescrites pour le croisement des trains, et, en général, pour empêcher la rencontre de trains marchant en sens contraire, semblent suffisantes pour garantir la sécurité sur ces aiguilles.

On peut aussi éviter les fausses directions en enclenchant l'aiguille avec le signal à distance de manière à ne permettre l'entrée des trains que lorsque l'aiguille est convenablement tournée. On peut en même temps ajouter un verrou, pour avoir la certitude que l'aiguille est bien appliquée. L'inconvénient de cette disposition, c'est la nécessité de manœuvrer l'aiguille chaque fois qu'un train la franchit par le talon, sous peine de briser la transmission. De là une complication dans le service et une chance d'accidents, sinon dangereux, du moins pouvant apporter un trouble dans la circulation.

Ici encore se fait sentir l'utilité d'un enclenchement qui n'empêche pas la prise en talon.

III

Nous nous sommes efforcés, dans ce qui précède, de formuler tous les cas dans lesquels des enclenchements pourraient être utiles et de dire quels devraient être le

appareils à enclencher. Reste à savoir s'il y a toujours opportunité à le faire.

Nous avons vu déjà que les enclenchements ne sont pas toujours sans inconvénient pour les manœuvres et même pour la sécurité, soit parce qu'ils ne permettent pas de prendre les aiguilles en talon sans les avoir tournées au préalable, soit parce que les taquets et autres appareils peuvent, s'ils ne sont pas manœuvrés en temps utile, amener sur les voies latérales des accidents de matériel susceptibles d'entraîner l'obstruction des voies principales.

Un inconvénient sérieux dans les gares de peu d'importance est la complication de personnel qu'entraîne l'enclenchement. Actuellement, après avoir couvert, s'il y a lieu, la voie principale, les agents peuvent, tout en suivant une manœuvre, tourner les aiguilles au fur et à mesure des besoins. Avec des enclenchements qui exigent, en général, la réunion des leviers par groupes, il faut un homme qui reste aux leviers et ne peut participer à la manœuvre. Dès que la gare est assez importante pour avoir un service spécial d'aiguilleur, cet inconvénient n'existe plus, et avec un système de correspondance qui permette toujours à l'aiguilleur de bien comprendre la manœuvre à effectuer, il y a tout intérêt à ce qu'il puisse donner les voies nécessaires sans se déplacer.

Nous avons fait remarquer que les dispositions locales ne permettent pas toujours d'appliquer les voies de sécurité ou même de placer utilement des signaux. Les taquets enclenchés, ou les blocs d'arrêt, qui n'en sont qu'une forme particulière, peuvent se placer partout; mais votre Commission, après avoir exprimé son opinion au sujet des grands services qu'ils paraissent susceptibles de rendre, estime qu'ils n'ont pas encore été suffisamment consacrés par la pratique, en France du moins, pour pouvoir faire l'objet d'une prescription administrative.

Enfin, nous avons fait remarquer que, dans beaucoup de

cas, les contrepoids fixes peuvent suppléer à l'enclenchement (*). Ils donnent les mêmes garanties contre les négligences ordinaires, puisque, pour faire passer un véhicule sur la voie qu'ils défendent, il faut soutenir le levier pendant toute la durée du passage, ou caler l'aiguille (**); d'autre part, ils ont l'avantage de permettre toujours de prendre l'aiguille en talon, et celui, plus important au point de vue de la sécurité, d'agir constamment et automatiquement. Il arrive quelquefois que les enclenchements manquent leur effet parce que les agents, après avoir pris les dispositions nécessaires, négligent de s'assurer qu'aucun train n'avait dépassé le disque à distance au moment où ils l'ont mis à l'arrêt. Il y a aussi des manœuvres dont le point de départ est en deçà des signaux enclenchés. Ce serait donc une erreur de croire que les enclenchements suffisent à prévenir tous les accidents, même en vue desquels ils ont été spécialement combinés.

Il y a des aiguilles qui, étant d'un usage peu fréquent, sont condamnées habituellement au moyen de chaînes ou de verrous cadenassés, mais dont le contrepoids n'est pas fixé, de façon que, lorsqu'on les a utilisées pour une manœuvre, elles ne reprennent pas automatiquement leur position normale. On peut toujours craindre que les agents

(*) Le contrepoids peut être rivé ou seulement fixé par une cheville cadenassée. Dans ce dernier cas, des mesures doivent être prises pour que le cadenas ne puisse être enlevé qu'avec les garanties nécessaires pour la sécurité. Il y a là un détail de réglementation dans lequel la Commission n'a pas à entrer.

(**) Ce calage, qui semble impliquer une intention formelle de fausser les mouvements, s'est cependant produit tout dernièrement sur le réseau du Midi par une simple négligence. Un aiguilleur avait calé une aiguille à contrepoids fixe pour la nettoyer, ce qui lui était d'ailleurs interdit par le règlement. Pendant cette opération, un train survint, et l'aiguilleur, en se précipitant pour le recevoir, oublia de remettre l'aiguille en place; de là une fausse direction et une collision.

chargés de la manœuvre négligent de les remettre dans cette position. Elles ne peuvent donc pas être assimilées aux aiguilles à contrepoids fixes dont nous venons de parler, et doivent être comprises, quand il y a lieu d'ailleurs, dans les combinaisons d'enclenchement.

Tenant compte de ces diverses considérations et du caractère spécial que présente la circulation sur certaines voies, comme celles qui desservent les remises de machines, la Commission croit devoir proposer les conclusions suivantes :

1° Dans toute gare où l'importance des manœuvres est suffisante pour motiver l'emploi d'agents affectés exclusivement et d'une manière permanente au service des aiguilles, on devra garantir les trains en marche, d'une part contre les fausses directions, d'autre part contre l'arrivée intempestive de véhicules provenant des voies latérales, au moyen d'enclenchements établis d'après les bases exposées dans le présent rapport et établissant la solidarité convenable entre les aiguilles, signaux ou autres appareils des diverses voies, soit principales, soit accessoires.

2° On devra, dans tous les cas, protéger les voies principales par des enclenchements à leur jonction avec les voies donnant accès à des remises ou dépôts de plus de quatre machines; il en sera de même aux points où sont établis des garages en pleine voie.

3° Toutefois l'emploi de contrepoids fixes ou à cheville cadenassée ou de dispositions équivalentes donnant normalement aux aiguilles la direction convenable pour assurer la sécurité de la circulation, pourra dans certains cas dispenser de les enclencher.

4° Dans les gares où il n'y a pas lieu, d'après ce qui précède, d'appliquer les enclenchements, toute aiguille formant jonction d'une voie principale et d'une voie accessoire doit être pourvue d'un contrepoids fixe ou à cheville cadenassée ou d'une disposition équivalente assurant nor-

malement la continuité de la voie principale, dans les deux cas suivants :

a. Lorsqu'elle est prise en pointe par les trains;

b. Lorsque la voie accessoire rencontre quelque part une autre voie principale.

5° Il y a lieu d'appeler l'attention des compagnies sur l'utilité de protéger les voies principales par des voies de sécurité toutes les fois que la disposition des lieux le permet, et, à défaut de ces voies, par des taquets ou blocs d'arrêt enclenchés.

6° Les dispositions qui précèdent sont applicables sur les lignes à voie unique; toutefois, pour les aiguilles de dédoublement des voies principales, l'enclenchement pourra être remplacé par l'emploi d'un contrepoids fixe ou à cheville cadenassée ou d'une disposition équivalente donnant normalement la direction convenable.

7° Les croisements à niveau de deux lignes, en pleine voie, devront être protégés par l'enclenchement des signaux des deux lignes, au même titre que les bifurcations.

Paris, le 24 avril 1883.

Le Rapporteur,
E. VICAIRE.

Le Président,
ROUSSELLE.

ANALYSE
DES RAPPORTS OFFICIELS
SUR LES ACCIDENTS DE GRISOU
SURVENUS EN FRANCE
PENDANT L'ANNÉE 1881

Dressée par M. CHESNEAU, Ingénieur au corps des Mines.

La Commission d'étude des moyens propres à prévenir les explosions de grisou a publié récemment, dans les *Annales des mines* (*), les premiers fascicules de l'analyse synoptique des rapports officiels sur les accidents de grisou en France, de 1817 à 1880, dressée, au nom de la Commission, par MM. Petitdidier et Charles Lallemand, ingénieurs au corps des mines. La Commission des Annales a pensé qu'il serait intéressant de continuer d'année en année ladite statistique, d'après le plan précédemment admis, et c'est le travail relatif à l'année 1881 que nous publions aujourd'hui.

Les 16 explosions de grisou survenues en France en 1881 ont fait 56 victimes, dont 23 tués et 33 blessés. Parmi ces catastrophes, l'une a été particulièrement douloureuse pour le Corps des mines: dans le bassin de Champagnac, le 28 mai, M. l'ingénieur des mines Bonnefoy a péri, avec le directeur de la houillère et trois autres personnes, pendant qu'il faisait une enquête officielle sur un accident de grisou arrivé trois jours auparavant, et qui avait occasionné la mort d'un ouvrier.

(*) Voir *Annales des mines*, 1er vol. de 1882, p. 293; 2e vol. de 1882, p. 393, et 2e vol. de 1883, p. 67.

pour

1. — BASSIN DE VALENCIENNES.

1. — Concession

(Instituée par décret

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers: Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers: Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes: de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
1	29 juillet	Fosse Saint-Mathieu — Niveau 538	4 (2 Asphyxiés, 2 brûlés)	5 Légèrement. brûlés.	792	Tonnes 208.291	Dégagement subit du grisou par une fissure.	Explosion d'un coup de mine.	

1881.

— Département du Nord.

de Douchy.

du 16 Février 1882).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'air entré par la fosse Saint-Mathieu suivait la voie de fond de la veine *Magenta*, au niveau 538, aérait les tailles en remontant, puis deux tailles en redescendant, et gagnait par un bure les travaux du niveau supérieur qu'il aérait avant de se rendre à la fosse Sainte-Barbe, au fond de laquelle un foyer d'appel énergique était établi. L'aérage était satisfaisant; la vitesse moyenne d'ascension de l'air dans le puits Sainte-Barbe était de 3 mètres et correspondait à 56 litres par ouvrier et par seconde.

Le règlement prescrivait la visite préalable des chantiers par un surveillant spécial avant l'arrivée des ouvriers, qui ne pouvaient d'ailleurs tirer la mine qu'après avoir constaté l'absence de grisou.

La présence du grisou n'avait été que rarement constatée dans la veine Magenta au niveau 538, et seulement en petite quantité.

Circonstances de l'accident. — Quatre ouvriers travaillaient aux abords d'un plan incliné en préparation, à une taille comprise entre deux voies de niveau, dans les travaux du levant de la veine Magenta. Deux d'entre eux étaient occupés à élargir la voie supérieure: un trou de mine ayant été foré et chargé dans le toit de la veine à l'avancement de celle-ci, l'un des ouvriers y mit le feu et se retira dans une voie montante près d'un ouvrier boiseur. Les trois autres allèrent se garer dans la voie inférieure. Ces cinq ouvriers ont été plus ou moins grièvement blessés, ainsi que quatre autres occupés dans le plan incliné; un dixième, placé à l'entrée de la voie de fond desservant les travaux de ce quartier, c'est-à-dire à une distance beaucoup plus considérable du théâtre de l'accident, fut jeté à terre et légèrement contusionné. Une dizaine d'ouvriers plus rapprochés de l'explosion que ce dernier ne furent nullement atteints. Sur les neuf victimes, deux ouvriers, qui n'ont pu être relevés qu'au bout de trois quarts d'heures, ne portaient que de légères brûlures mais avaient succombé à l'asphyxie; trois autres, dont deux succombèrent plus tard, étaient grièvement brûlés; les derniers n'avaient que des contusions ou des brûlures sans gravité.

Après le sauvetage, on a constaté que les boisages étaient intacts; seules les portes d'aérage placées au bas du plan incliné avaient été défoncées, et l'interruption du courant d'air a augmenté la gravité de l'accident.

Remarques particulières. — On a rapporté la cause de l'accident à un dégagement subit de grisou produit par le coup de mine et qui se serait fait jour par une fissure très apparente au toit, sur une longueur de plus de 2m, mais qui devait être imperceptible lors du forage du trou.

Une demi-heure avant l'accident, un coup de mine, placé à une vingtaine de mètres, avait été tiré sans produire d'inflammation. On n'a pas trouvé trace de grisou dans la fissure vingt-sept heures après l'accident. Les mineurs, en d'autres parties de la veine Magenta, ont fréquemment constaté de pareilles fissures donnant lieu à des dégagements subits de grisou.

1. — BASSIN DE VALENCIENNES.

2. — Concession

(Instituée

N°s d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	Causes indirectes. 10
						Tonnes			
2	29 octobre	Fosse Renard.	»	7 Brûlés légèrement.	6.835	1.384.460	Inconnues.	Tirage d'un coup de mine.	Cause fortuite.

3. — Concession

(Instituée par décret

3	22 octobre	Fosse Leforest	1 Brûlé	4 Brûlés assez grièvement.	960	296.638	Petite accumulation de grisou au toit d'une galerie montante.	Lampe de sûreté ouverte ou mal fermée.	Imprudence de l'une des victimes qui aura ouvert sa lampe de sûreté pour prendre de l'huile ou bien qui l'aura mal fermée.

— Département du Nord.

d'Anzin.

en 1717).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'aérage produit par deux foyers d'appel de 4 m.q. chacun, établis sur les anciens puits Orléans et Casimir, était satisfaisant. L'air descendant dans le puits Renard jusqu'à l'accrochage de 476m suivait la bowette, sud jusqu'à la rencontre de la veine Édouard où il se subdivisait au bas des tailles en deux courants partiels, destinés à en parcourir successivement tous les fronts. Ces deux courants se réunissaient dans la galerie où est arrivé l'accident, pour remonter par une cheminée dans la veine à l'étage de 376m. Après un parcours assez étendu au niveau de 343m l'air suivait la bowette sud de l'étage de 200m du puits d'Orléans par lequel il sortait,

Le volume d'air circulant dans ces travaux était de 52mc, 47 à la seconde (observation de 1880) chiffre correspondant à 60 litres au minimum par ouvrier.

Circonstances de l'accident. — A l'extrémité de la bowette sud de l'étage de 476m, six tailles étaient en exploitation de chaque côté d'un plan incliné. On préparait la voie de roulage de la 7me taille et pour l'élargir on avait foré un trou de mine au toit de la veine. Quelques instants après l'explosion de cette mine, il se produisit une inflammation de grisou qui brûla légèrement le boute-feu retiré à 15 mètres au levant du trou de mine, et six ouvriers travaillant dans la sixième taille du couchant.

Avant de mettre le feu à la mine, le boute-feu et un mineur qui l'aidait, avaient constaté l'absence du grisou au toit de la galerie. Deux jours après l'accident, on n'a pas non plus constaté la présence du grisou.

Remarques particulières. — Le courant d'air en arrivant au point de l'explosion n'avait encore traversé que les six tailles inférieures; et le trou de mine était foré à 5m seulement du bas de la cheminée, servant au retour d'air, dans un endroit où la vitesse du courant était considérable. On n'a n'a pu assigner de cause plausible à cet accident.

de l'Escarpelle.

du 27 Novembre 1850).

Indications générales. — L'aérage des travaux de la fosse Leforest se faisait au moyen d'un ventilateur Lemielle mû par une machine à vapeur de 12 chevaux qui aspirait l'air des travaux par un goyau réservé dans le puits d'extraction lui-même. Le volume d'air extrait par seconde était de 4m3, 730, ce qui correspondait à environ 30 litres par ouvrier. L'air descendait par le puits, se divisait au niveau de l'étage de 340m en deux parties : l'une suivait la bowette du midi et aérait les travaux de la veine Camaron ; l'autre suivait la bowette du Nord jusqu'à la rencontre de la veine du Nord, où il se divisait en trois courants partiels. Le premier suivait la voie de fond du Levant, arrivait au plan incliné où a eu lieu l'accident, qu'il parcourait dans toute sa hauteur, suivant le front de taille et la cheminée et arrivait ainsi à la voie de fond de l'étage de 300 mètres ; il se réunissait aux deux autres courants, ces deux derniers ayant fait un certain parcours, et reconstituait ainsi le courant total d'aérage des travaux de la veine du Nord, qui suivait alors la bowette du nord de l'étage de 300 mètres et par un recoupage allait rejoindre le courant d'aérage des travaux de la veine Canicule. Les deux courants réunis remontaient jusqu'à l'étage de 240m, suivaient les travaux supérieurs de la veine Canicule et allaient rejoindre les beurtiats latéraux du puits qui les conduisaient au goyau.

1. — BASSIN DE VALENCIENNES.

3. — Concession

N° d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10

2. — BASSIN D'HARDINGHEN.

1. — Concession

(Instituée par décret

						tonnes.			
4	18 octobre	Fosse Renaissance. — Niveau 167	»	2 Brûlés dont 1 grièvement.	432	57.329	Dégagement de gaz, par un trou de sonde ayant percé dans des chantiers grisouteux remblayés ou abandonnés.	Lampes à feu nu.	

— Département du Nord.

de l'Escarpelle (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Circonstances de l'accident. — On avait ouvert récemment dans la veine du nord à 50 mètres du travers-banc de l'étage de 340^m un plan incliné destiné à mettre en communication cet étage avec celui de 300^m; il ne restait plus que 3 à 4 mètres à percer pour établir la communication. Le grisou s'étant montré depuis quelques jours à la partie supérieure de cet ouvrage, on avait établi un petit ventilateur à bras que l'on faisait marcher pendant dix à quinze minutes à l'arrivée des ouvriers. Deux ouvriers s'étaient mis en mesure de chasser le grisou au moyen du ventilateur, ayant rencontré de la résistance dans l'appareil, ils décidèrent d'en graisser les rouages; l'un d'eux, ne voyant pas très clair, éleva brusquement sa lampe jusqu'au toit, et occasionna une inflammation de grisou qui leur causa à tous deux des brûlures peu graves. Malheureusement la flamme en se propageant dans la voie de herschage rencontra, à 3^m du plan incliné, six galets de poudre de 50 grammes chacun et un rouleau de fusées nécessaires au tirage de coups de mine. La poudre fit explosion et brûla de nouveau les deux premières victimes, l'une d'elles mourut des suites de ses brûlures. Trois autres mineurs qui se trouvaient dans la voie de herschage furent également atteints par les flammes, ils purent néanmoins se sauver jusqu'à l'accrochage de 340^m d'où ils furent remontés immédiatement au jour.

Remarques particulières. — Il est permis de douter de la version qu'a faite l'une des deux premières victimes en soutenant que les lampes de sûreté n'avaient pas été ouvertes, ce qui ne permettrait pas d'expliquer l'inflammation du gaz. Les cinq lampes de sûreté ont été retrouvées en bon état, deux avaient été manifestement ouvertes après la descente dans le puits. On est donc fondé à croire que l'une d'elles a été employée pour le graissage du ventilateur, bien que la victime ait prétendu que l'huile d'une vieille lampe avait servi à cet usage, les recherches faites pour retrouver cette dernière n'ayant donné aucun résultat.

L'aérage de la mine était suffisant. Si les précautions habituelles avaient été observées il n'y aurait pas eu d'accident. La visite faite peu de temps après l'explosion n'a pas laissé voir de traces de grisou appréciables à la lampe.

Les lampes n'étant pas numérotées, il n'a pas été possible de savoir à qui appartenaient celles qui avaient eté ouvertes.

— Département du Pas-de-Calais.

d'Hardinghen.

du 19 Frimaire an IX).

Indications générales. — Aucune trace de grisou n'avait été constatée dans la mine avant l'accident. L'aérage paraissait satisfaisant; on se servait de lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident. — On avançait une voie dans le massif au voisinage des anciens travaux remblayés et abandonnés de la fosse Espoir. Les ouvriers se faisaient précéder d'un trou de sonde de 5 à 6^m de profondeur. Le trou de sonde ayant subitement donné de l'eau, les ouvriers s'enfuirent craignant une inondation. Le surveillant, suivi de son aide, étant revenu au front de taille pour

2. — BASSIN D'HARDINGHEN

1. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10

3. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

1. — Concession de Roche-

(Instituée par décret

						Tonnes.			
5	17 mai	Puits du Sagnat. — 11e Niveau.	8 Brûlés.	3 Brûlés dont 1 légèrement.	1.955	577.532	Chantiers en cul-de-sac.	Etoupille frottée contre le tamis d'une lampe Davy.	Imprudence du sous-gouverneur, l'une des victimes, qui, bien qu'ayant constaté la présence du grisou, avait allumé un bout d'étoupille nécessaire au tirage d'un coup de mine.

- Département du Pas-de-Calais.

d'Hardinghem (*suite*).

OBSERVATIONS.
11
se rendre compte de la venue d'eau, une explosion locale se fit entendre, qui blessa l'aide assez légèrement, et le surveillant, grièvement à la figure. **Mesures prises à la suite de l'accident.** — Les ouvriers ont été munis de lampes Mueseler et la visite des chantiers avant l'arrivée des ouvriers a été prescrite.

— Département de la Loire.

la-Molière et Firminy.

du 11 juin 1757).

Indications générales. — Depuis cinq jours le grisou se dégageait avec persistance dans les travaux du 11ᵉ niveau.

Eu égard à la présence du grisou l'aérage était défectueux. La région sud du puits Sagnat recevait le courant d'air du puits du Crêt et ce courant parcourait en *descendant* le grand plan incliné entre le 12ᵉ niveau et la galerie de roulage du puits du Sagnat dans la couche de la Grille.

Circonstances de l'accident. — Un sous-gouverneur était descendu dans la mine vers 4 heures du matin pour visiter les chantiers placés sous sa surveillance. Ayant constaté la présence du grisou sur une hauteur de 0^m40 à 0^m50 dans un chantier en cul-de-sac, il en prévint immédiatement les ouvriers leur recommandant de se tenir sur leurs gardes. Vers 6 h. 1/2 du matin, ayant à allumer un coup de mine, laissé par les ouvriers du poste précédent, le sous-gouverneur commit l'imprudence de se servir pour cette opération d'un bout d'étoupille qu'il frotta contre le tamis de sa lampe Davy. Voyant le grisou s'enflammer, il se jeta la face contre terre et ne fut que légèrement brûlé; malheusement dix ouvriers qui travaillaient à proximité, le furent beaucoup plus grièvement, huit d'entre eux moururent successivement des suites de leurs brûlures.

Remarques particulières. — Le sous-gouverneur victime de l'accident avait la mauvaise habitude, contrairement aux ordres formels de ses chefs, d'allumer les coups de mine en frottant un bout de mèche contre le tamis de sa lampe. Son chef immédiat, le gouverneur, sachant que le grisou se dégageait avec persistance depuis quelques jours dans les travaux du 11ᵉ niveau aurait dû interdire le tirage à la poudre et prévenir la Direction, cette dernière aurait dû, si elle avait connu ces faits, faire établir deux portes d'aérage pour activer la ventilation des chantiers grisouteux.

3. — BASSIN DE SAINT-ETIENNE.

2. — Concession

(Instituée par décret

N°s d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT. Causes directes de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT. Causes directes de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT. Causes indirectes. 10
						Tonnes.			
6	7 août	Puits du Cros.	»	1 Brûlé grièvement.	431	173.590	Petit dégagement de grisou dans une galerie en remonte.	Lampe à feu nu.	Cause fortuite.

3. — Concession

(Instituée par décret

N°s d'ordre.	DATE de l'accident.	LIEU de l'accident.	Tués.	Blessés.	OUVRIERS au fond.	PRODUCTION annuelle de la mine.	de l'accumulation du gaz.	de l'inflammation du gaz.	Causes indirectes.
7	9 mai	Puits Caintin.	»	2 Brûlés dont 1 légèrement.	1063	312.091	Cloche formée au toit d'un niveau.	Flamme d'un coup de mine.	Imprudence de de l'un des ouvriers qui, malgré les ordres qu'il venait de recevoir du gouverneur, avait

— Département de la Loire.

du Cros.

du 27 Octobre 1824).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — L'aérage était suffisant.
On employait exclusivement des lampes à feu nu.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers travaillaient à l'avancement d'une galerie en remonte. A la fin de leur journée, il fut convenu avec le sous-gouverneur que l'un d'eux reviendrait le lendemain, qui était un dimanche, pour travailler à la réfection de certaines parties des galeries.

Le dimanche vers quatre heures du matin, l'ouvrier se rendait donc à son chantier pour y prendre quelques outils. Il avait pénétré environ d'une douzaine de mètres, lorsqu'il se vit entouré tout à coup de flammes. Renversé par la commotion, il put se relever et courir vers le plan incliné, où des camarades l'aidèrent à se débarrasser de ses vêtements qui étaient en feu. Il fut brûlé grièvement à la figure, aux bras et aux jambes,

Remarques particulières. — La galerie où a eu lieu l'accident était en cours d'avancement pour percer, en vue de l'aérage, dans le niveau supérieur. Elle était en cul-de-sac, éloignée d'une cinquantaine de mètres du dernier passage d'air, et d'une longueur de 25m ; bien qu'aérée par diffusion, elle l'était suffisamment.

Depuis plus d'un demi-siècle que la mine du Cros était en exploitation, jamais on n'y avait constaté la présence du grisou, ce qui explique l'emploi exclusif des lampes à feu nu. Le dégagement de grisou qui a précédé l'accident a donc été un fait exceptionnel, dû probablement à un changement brusque qu'on avait remarqué dans l'allure de la couche, devenue beaucoup plus tendre et même mourceuse en certains endroits. La veille de l'accident, le chantier avait été visité à 9 h. et à 11 h. du soir, les gouverneurs chargés de cette visite avaient été jusqu'au front de taille avec leurs lampes à feu nu et sans rencontrer de grisou.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Il a été décidé que, tous les matins avant l'arrivée des ouvriers, une visite du chantier serait faite par le gouverneur qui serait muni d'une lampe de sûreté.

Le chantier où a eu lieu l'accident a été remblayé, et on y a suspendu toute extraction, jusqu'à ce que le champ d'exploitation qui précède et qui se trouve en plein retour d'air, ait été déhouillé.

la Béraudière.

4 Novembre 1824).

Circonstances de l'accident. — On procédait depuis quelques jours au puits Caintin au relevage d'un niveau d'exploitation pour permettre le passage des bennes, la couche exploitée n'ayant que 1m de puissance. Le travail touchait à sa fin et le 9 mai deux ouvriers furent commandés pour le terminer. L'un d'eux après avoir mis le feu à un coup de mine, se retira près de son camarade qui se trouvait à 15 mètres de distance, au moment où il arrivait près de ce dernier, l'explosion du coup de mine eut lieu et fut suivie d'une flambée de grisou qui les brûla tous deux dont l'un légèrement.

Remarques particulières. — Le matin de l'accident, le gouverneur avait constaté dans sa visite qu'il y avait un peu de grisou dans le chantier, après avoir désigné les deux ouvriers qui devaient

3. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

3. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	Causes indirectes. 10
						Tonnes.			mis lui-même le feu à un coup de mine.

4. — Concession

(Instituée par décret

8	31 décembre.	Puits des Maronniers. — 8e couche.	1 Brûlé assez grièvement.	»	887	209.268	»	Allumage d'un coup de mine.	Imprudence de la victime qui sachant la présence du grisou, avait voulu allumer un coup de mine. - Imprévoyance du gouverneur qui tolérait que les ouvriers allumassent eux-mêmes les coups de mine.

5. — Concession

(Instituée par décret

9	31 mai	Puits Saint-Privat.	»	4 Brûlés dont 2 légèrement.	188	43.741	»	Flamme d'un coup de mine.	Cause fortuite.

a. — Département de la Loire.

de la Béraudière (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

terminer le travail, il leur recommanda d'agir avec la plus grande précaution, il leur défendit également de faire partir eux-mêmes les coups de mine et d'aller chercher à cet effet un ouvrier spécialement chargé de ce service.

Le coup de mine était à la sole du chantier à 5^m d'une cloche qui s'était formée, quelques jours avant l'accident. Il est probable qu'une certaine quantité de grisou avait dû s'y accumuler et que le coup de mine l'a enflammé.

du Quartier-Gaillard.

17 Novembre 1824).

Indications générales. — La présence du grisou avait été constatée dans certaines parties du puits *des Maronniers*.

L'allumage des coups de mine était confié à un ouvrier spécialement chargé de ce service.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers travaillaient à l'avancement d'une remontée dans la 8e couche, reliant les 6e et 8e niveaux; la présence du grisou ayant été signalée, on avait installé un ventilateur, mais la colonne de tuyaux étant devenue insuffisante, on dut procéder à son allongement.

Le 31 décembre l'un des deux ouvriers avait posé une première colonne de 4^m de tuyaux; comme elle était insuffisante, un sous-gouverneur envoya chercher d'autres tuyaux et continua sa tournée d'inspection après avoir renvoyé les deux ouvriers qui n'étaient pas occupés, dans un autre chantier.

En attendant que les tuyaux fussent apportés, l'ouvrier chargé du travail ne voulant pas perdre son temps, se mit à creuser une sous-cave, puis un trou de mine de 1^m de profondeur; comme il se disposait à l'allumer avec de l'amadou celui-ci enflamma le gaz, qui le brûla assez fortement aux bras et aux reins.

Remarques particulières. — La victime a prétendu avoir constaté l'absence du grisou; si vraiment cette précaution a été prise, elle ne l'a été que très superficiellement.

Le gouverneur savait parfaitement que les ouvriers allumaient eux-mêmes quelques coups de mine, il n'eût pas dû tolérer cet état de choses, la Direction ayant chargé de ce service un ouvrier afin d'éviter les accidents.

du Plat-de-Gier.

du 9 Mars 1850).

Indications générales. — L'aérage général de la mine était assez actif.

Le puits Saint-Privat exploite aux profondeurs de 536 et 585^m deux couches de houille légèrement grisouteuses.

Depuis 1873 l'emploi des lampes Mueseler était général dans cette partie de la mine.

Le charbon était dur et compact; l'abatage nécessitait l'emploi de la poudre.

3. — BASSIN DE SAINT-ÉTIENNE.

5. — Concession

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT Causes directes de l'accumulation du gaz. 8	Causes directes de l'inflammation du gaz. 9	Causes indirectes. 10

4. — BASSIN DU GARD.

1. — Concession de Trelys

(Instituée par décret

						Tonnes.			
10	15 mars	Couche Saint-Félix.	»	1 Brûlé grièvement.	897	206.452	»	Allumage d'un coup de mine.	Imprudence de la victime qui n'a pas pris les précautions nécessaires avant le tirage d'un coup de mine.

– Département de la Loire.

du Plat du Gier (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Circonstances de l'accident. — Trois ouvriers exploitaient un chantier compris entre une galerie de niveau et une faille. L'un d'eux avait déjà tiré un premier coup de mine à 9 heures du matin; quelques heures après, il chargeait un deuxième coup, le sous gouverneur se trouvant là voulut l'allumer. Après avoir examiné avec sa lampe si le grisou existait et ayant constaté qu'il n'y en avait pas, il mit le feu au coup de mine et s'éloigna avec les trois ouvriers; lorsque l'explosion eut lieu, ils étaient à l'abri des projections. Malgré ces précautions ils furent atteints par les flammes, renversés et brûlés tous quatre; deux ne le furent que légèrement.

Remarques particulières. — Le coup de mine avait été allumé avec une mèche de sûreté goudronnée, à laquelle le gouverneur avait mis le feu en découvrant sa lampe Mueseler, ce qui était d'ailleurs une imprudence regrettable. Le coup a fait canon et n'a arraché qu'un peu de charbon autour de son embouchure.

La présence du grisou paraît être tout à fait accidentelle. Le lendemain de l'accident, malgré un chômage de 24 heures, on n'a retrouvé aucune trace de grisou.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Les exploitants ont été invités à abandonner le mode actuel d'allumage des coups de mine et à lui substituer l'emploi des substances ne donnant pas de flamme tel que l'amadou allumé au briquet conformément aux recommandations rédigées par la Commission du grisou.

— Département du Gard.

et Palmesalade.

du 27 Août 1828).

Indications générales. — L'aérage de la mine était suffisant.

Circonstances de l'accident. — Trois ouvriers étaient occupés dans un chantier où un coup de mine avait été préparé; l'un d'eux y mit le feu et au lieu de suivre ses camarades qui se mettaient à l'abri, il resta pour s'assurer que sa mèche Bickford prendrait bien feu; au moment où elle commençait à fuser, une inflammation de grisou se produisit et brûla grièvement cet ouvrier; ses deux camarades furent renversés par la violence du choc, mais n'eurent aucune blessure.

Remarques particulières. — L'aérage de la mine était considéré comme suffisant, mais à condition toutefois que le tirage des coups de mine fût confié à un ouvrier spécial.

Un arrêté du Préfet du Gard prescrivait la visite du chantier avant le tirage d'un coup de mine, et si la présence du grisou était signalée, il était défendu de faire le tirage du coup de mine sans autorisation spéciale du maître-mineur. Cette prescription n'avait pas été observée.

4. — BASSIN DU GARD.

1. — Concession de Trelys

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers — Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers — Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes directes — de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT — Causes indirectes. 10
						tonnes.			
11	25 avril	Galerie du Plan.	»	1 Brûlé légèrement.	897	206.452	Chômage dans un chantier en remonte.	Lampe à feu nu.	»
12	3 juin	Couche Sainte-Barbe.	»	2 Brûlés légèrement.	897	206.452	»	Flamme d'un coup de mine.	Imprudence d'une des victimes qui avait mis le feu à un coup de mine sans vérifier si le grisou existait, ainsi que le prescrivait le règlement.

2. — Concession de

(Instituée par décret

13	16 avril	Puits Sud.	»	1 Brûlé.	766	154.048	»	Flamme d'un coup de mine.	Imprudence de la victime qui n'avait pas pris les précautions nécessaires avant

— Département du Gard.

et Palmesalade (suite).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — La galerie du Plan était bien aérée ; elle était d'exploitation récente et l'on n'y avait pas encore constaté la présence du grisou. L'emploi des lampes à feu nu y était exclusif

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier se rendant à son travail, s'élevait dans une galerie en remonte en portant sa lampe à feu nu au-dessus de sa tête pour s'éclairer, une petite quantité de grisou s'enflamma et lui fit des brûlures sans gravité.

Remarques particulières. — La quantité de grisou enflammé a été très minime, et l'explosion n'a pas produit de dégât matériel

Le chômage du dimanche a pu permettre à une très petite quantité de grisou de s'accumuler dans cette galerie qui n'était aérée que par diffusion

Mesures prises à la suite de l'accident. — La Direction a prescrit l'emploi des lampes de sûreté. Les visites de surveillance ont été faites par des employés spéciaux avant la reprise ou après la suspension des travaux. Un arrêté préfectoral a déclaré la mine « mine à grisou, » et lui a appliqué la réglementation des mines grisouteuses du département du Gard.

Indications générales. — L'emploi des lampes de sûreté était général.

Le chantier où a eu lieu l'accident ainsi que les sentiers voisins, étaient grisouteux.

Circonstances de l'accident. — Deux ouvriers travaillaient à deux avancements de galerie très voisins l'un de l'autre. L'un avait suspendu son travail et attendait son camarade qui venait d'allumer un coup de mine et se retirait ; une inflammation de grisou se produisit et leur causa à tous deux des brûlures légères.

Remarques particulières. — Dans la mine était affichée une prescription formelle indiquant que les ouvriers ne devaient pas allumer un coup de mine sans s'être assurés qu'il n'y avait pas de grisou, ce que la victime n'ignorait pas.

Après l'accident du 15 mars qui avait eu lieu dans les mêmes conditions, la Direction avait pris l'engagement de prescrire et de faire exécuter la mesure consistant à ne permettre dans l'étendue des chantiers grisouteux de la concession le tirage à la poudre qu'en présence du maître-mineur ou du chef de poste, après un examen sérieux constatant l'absence du grisou.

Portes et Sénéchas.

du 19 Octobre 1874).

Indications générales. — L'aérage se faisait au moyen d'un ventilateur établi sur le puits d'aérage.

Le quartier du puits sud était grisouteux. On y employait des lampes de sûreté.

Circonstances de l'accident. — Un ouvrier avait préparé au front d'un avancement un coup de mine plongeant ; celui-ci, en partant, mit le feu à du grisou retenu entre les chapeaux des cadres du boisage. L'ouvrier reçut quelques brûlures.

4 — BASSIN DU GARD

2. — Concession de

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT Causes directes de l'accumulation du gaz. 8	de l'inflammation du gaz. 9	Causes indirectes. 10
									de mettre le feu à un coup de mine.

5. — BASSIN DE St-ÉLOI.

1. — Concession

(Instituée par décret

						Tonnes			
14	16 avril	»	2 Mutilés par des projections de matériaux.	»	610	112608	Gaz détonant provenant de massifs de houille en combustion.	Inconnue	»

— Département du Gard.

Portes et Sénéchas (*suite*).

OBSERVATIONS.

11

Remarques particulières. — La victime a soutenu avoir vérifié l'absence du grisou; cet examen a été fait d'une manière très légère. Une grande quantité de grisou a dû se dégager pour qu'il en soit resté entre les chapeaux des cadres, alors que 520 litres d'air par seconde passaient à 7m de l'endroit où a eu lieu l'accident.

Mesures prises à la suite de l'accident. — La Direction a fait afficher sur les carreaux des mines un avis rappelant aux ouvriers l'exploration des chantiers avant le tirage des coups de mine, etc.

— Département de l'Allier.

de la Vernade.

du 27 Octobre 1837).

Indications générales. — La mine de la Vernade est depuis longtemps la proie de vastes incendies. On avait ménagé à proximité des parties en feu une galerie permettant d'exercer une surveillance de leurs progrès. Depuis quelques temps on avait constaté des dégagements de gaz méphitique principalement dans les remblais du toit de cette galerie. Ces gaz, provenant de la distillation de la houille, augmentant d'une façon inquiétante (le surveillant des feux avait déjà éprouvé un commencement d'asphyxie), on se décida à enfermer la partie dangereuse de la galerie entre deux barrages étanches.

Circonstances de l'accident. — Les deux barrages étaient à peu près terminés, il ne restait plus qu'à les clore et à enduire l'un d'eux. Le courant d'air, qui continuait à passer par les ouvertures laissées dans les barrages jusqu'à leur fermeture définitive, était très faible et les abords des barrages n'étaient plus aérés que par diffusion. Après avoir fermé les barrages, le chef de poste se retira avec ses ouvriers au pied d'une cheminée où il trouva ceux qui devaient les remplacer; il en envoya deux pour achever les enduits et ceux-ci se rendirent seuls au chantiers. Presque aussitôt une forte commotion renversa le chef de poste et les cinq hommes à côté de lui. Aucune flamme n'apparut et le bruit de l'explosion fut assez faible; toutes les lampes (à feu nu) s'éteignirent.

Après quelques tentatives, infructueuses à cause de l'air vicié, pour parvenir auprès des deux victimes on finit par arriver auprès du barrage le plus voisin de la cheminée, qui avait été emporté par l'explosion ainsi que l'autre; les cadavres des deux victimes gisaient à terre sans trace de brûlures mais mutilés par toutes sortes de débris projetés par l'explosion. Des pierres avaient été lancées jusqu'à 7 mètres du barrage où avaient péri les deux victimes; au-delà de l'autre barrage, des cadres en fer et une porte en tôle avaient été violemment arrachés.

Remarques particulières. — Ce n'est pas au grisou, gaz très rare dans les mines de Saint-Éloi, mais aux gaz inflammables provenant des massifs en feu, qu'on a attribué la cause de l'accident. On n'a pu assigner de cause précise à l'inflammation du mélange détonant, confiné entre les deux barrages; elle a été peut être déterminée par un éboulement ayant mis le gaz détonant en contact avec de la houille en ignition.

6. — BASSIN DE CHAMPAGNAC

1. — Concession

(Instituée par décret

Nos d'ordre. 1	DATE de l'accident. 2	LIEU de l'accident. 3	NOMBRE d'ouvriers Tués. 4	NOMBRE d'ouvriers Blessés. 5	OUVRIERS au fond. 6	PRODUCTION annuelle de la mine. 7	CAUSES DE L'ACCIDENT Causes directes de l'accumulation du gaz. 8	CAUSES DE L'ACCIDENT Causes directes de l'inflammation du gaz. 9	CAUSES DE L'ACCIDENT Causes indirectes. 10
15	25 mai	»	1 Brûlé	»	70	Tonnes 3879	Ralentissement ou suspension de l'aérage (naturel),	Emploi d'une lampe à feu nu.	Imprudence de la victime.
16	28 mai	»	5 Brûlés	»	id.	id.	Même cause.	Inconnue.	Inconnue.

— Département du Cantal.

de Lampret.

du 5 août 1838).

OBSERVATIONS.

11

Indications générales. — La concession de Lampret comprend deux couches de houille, la grande et la petite couche, séparées par un banc de roche stérile. Deux galeries d'allongement jumelles y étaient poussées, à l'est et à l'ouest d'un grand travers-banc amenant les charbons au niveau du chemin de fer d'Eygurande à Vendes. L'aérage naturel se faisait à l'est de la manière suivante : l'air entrant par le puits, dit du sondage, suivait le travers-banc jusqu'à la galerie d'allongement de la petite couche qu'il parcourait jusqu'à son extrémité Est, arrivait par une traverse au rocher dans la galerie d'allongement de la grande couche qu'il suivait jusqu'à sa rencontre avec une grande descenderie par laquelle il sortait au jour. Mais suivant l'état de l'atmosphère et la température, l'air suivait parfois une marche inverse, et le renversement du courant avait lieu, avant l'accident, deux fois par vingt-quatre heures.

Circonstances de l'accident. — La galerie d'allongement de la grande couche ayant rencontré une faille stérile grisouteuse à 25^{m} de la traverse du retour d'air venant de la petite couche, on avait dû munir les ouvriers de lampes de sûreté et installer un ventilateur rejetant le grisou dans le courant d'air naturel. Mais après avoir avancé de quelques mètres on dut s'arrêter, le grisou devenant plus abondant et l'on ferma le chantier par un barrage en planches, jusqu'à ce qu'on pût le mettre en communication avec un puits voisin, le puits des Plattes. Les ouvriers reçurent l'ordre verbal de ne pas s'engager dans les chantiers à l'Est de la grande descenderie, que le maître mineur visitait seul chaque jour. Un ouvrier ayant voulu se procurer un outil abandonné dans la galerie d'allongement à l'est de la descenderie, y pénétra avec une lampe à feu nu et à 20 mètres environ en deçà du barrage, une explosion eut lieu qui lui fit des blessures paraissant peu graves et dont il mourut cependant, peu de temps après qu'on l'eût retiré de la mine.

Remarques particulières. — Le lieu de l'accident était situé sur le retour d'air et ce n'est qu'au ralentissement ou au renversement du courant d'air qu'on peut attribuer l'accumulation du grisou, si peu abondant que le maître-mineur y avait fait le matin sa tournée avec une lampe à feu nu.

Circonstances de l'accident. — Trois jours après l'accident précédent, M. l'ingénieur des mines Bonnefoy, s'étant rendu à la mine pour faire son enquête, y descendit à neuf heures du soir, accompagné de l'ingénieur des travaux, du maître-mineur, d'un ouvrier et d'un ingénieur étranger. Ils étaient tous munis de lampes de sûreté Muëseler. Arrivé au point où la victime du 25 mai avait été mortellement brûlée, l'ingénieur des travaux souleva le capuchon de sa lampe munie de l'appareil Mallard, et constata la présence du grisou. M. Bonnefoy continua néanmoins sa marche en avant suivi du maître-mineur et de l'ouvrier, les deux autres ingénieurs fermant la marche. Soudain une détonation eut lieu : M. Bonnefoy, le maître-mineur et l'ouvrier furent tués sur le coup, affreusement brûlés; l'ingénieur des travaux et l'ingénieur étranger, retirés vivants de la mine, succombèrent au bout de quelques jours aux suites de leurs brûlures.

Remarques particulières. — Cette explosion, comme la première, a été attribuée à une accumulation de grisou, résultant d'un trouble momentané dans l'aérage. La détonation dans les deux cas a été très faible, et les dégâts matériels peu importants. Les lampes de sûreté, examinées avec le plus grand soin, n'ont offert aucune trace d'altération.

Mesures prises à la suite de l'accident. — Les ouvriers ont tous été munis de lampes Muëseler et la Direction de la mine a décidé l'installation d'un ventilateur sur le puits des Plattes qui communique actuellement avec les travaux de la grande couche.

RÉSUMÉ.

Le tableau suivant résume d'une façon sommaire les causes présumées des accidents qui viennent d'être passés en revue (*) :

BASSINS houillers.	CONCESSIONS.	ACCIDENTS.	VICTIMES. Tués.	Blessés.	CAUSES PRÉSUMÉES DES ACCIDENTS.
Nord et Pas-de-Calais.	Douchy	1	4	5	Explosion du grisou dégagé subitement par une fissure à la suite de l'explosion d'un coup de mine.
	Anzin	1	»	7	Inflammation de grisou par l'explosion d'un coup de mine.
	L'Escarpelle	1	1	4	Inflammation de grisou par une lampe de sûreté supposée mal fermée. Des cartouches placées dans le voisinage ont pris feu.
	Hardinghen	1	»	2	Emploi de lampes à feu nu. Dégagement de gaz, par un trou de sonde, dans une galerie d'avancement percée au-dessus d'anciens remblais.
Loire	Roche-la-Molière	1	8	3	Inflammation de grisou lors de l'allumage d'un coup de mine.
	Le Cros	1	1	»	Emploi (habituel) de lampes à feu nu. L'accident a eu lieu le matin, lors de la reprise du travail, dans une galerie en cours d'avancement devant servir à l'aérage.
	La Béraudière	1	»	3	Inflammation de grisou par l'explosion d'un coup de mine.
	Quartier-Gaillard	1	1	»	Inflammation de grisou lors de l'allumage d'un coup de mine.
	Plat-de-Gier	1	»	4	Explosion d'un coup de mine.
Gard	Trélys et Palmesalade.	1	»	1	Inflammation de grisou lors de l'allumage d'un coup de mine.
	Idem	1	»	1	Emploi (habituel) de lampes à feu nu. Inflammation de grisou dans un chantier en remonte.
	Idem	1	»	2	Inflammation de grisou lors de l'allumage d'un coup de mine.
	Portes et Sénéchas	1	»	1	Inflammation de grisou par l'explosion d'un coup de mine.
Saint-Éloi	La Vernade	1	2	»	Emploi (habituel) de lampes à feu nu. Dégagement de grisou dans le voisinage d'un incendie souterrain.
Champagnac.	Lampret	1	1	»	Ralentissement ou suspension de l'aérage (naturel). Emploi d'une lampe à feu nu.
	Idem	1	5	»	Même cause, malgré l'emploi de lampes Mueseler, l'accident étant arrivé au même endroit, trois jours après le précédent.
	Totaux	16	23	33	

(*) Ce tableau est extrait, sauf quelques légères modifications, de la *Statistique de l'industrie minérale et des appareils à vapeur en France et en Algérie*, pour l'année 1881, dressée par M. l'ingénieur en chef des mines O. Keller.

On peut grouper, comme il suit, ces accidents, par rapport aux circonstances dans lesquelles ils se sont produits :

		Accidents.	Tués.	Blessés.
Tirage à la poudre. .	Allumage des coups de mine. .	4	9	6
	Explosion des coups de mine. .	5	4	20
Défaut d'aérage local.	Emploi des lampes à feu nu. . .	5	4	3
	Emploi des lampes de sûreté . .	2	6	4
Totaux.		16	23	33

On voit ainsi que plus de la moitié des accidents (9 sur 16) sont dus à l'omission ou à l'insuffisance des précautions lors du tirage à la poudre ; ce sont aussi eux qui ont fait le plus de victimes (39 sur 56, dont 13 tués et 23 blessés). Sur les 7 accidents dus au défaut d'aérage local, deux seulement ont été attribués à une imprudence des victimes.

Sur 10.000 ouvriers employés à l'intérieur des mines de houille, il y a eu, en 1881, 3,0 tués et 3,9 blessés par suite d'explosions de grisou. L'importance relative des explosions de grisou, sur l'ensemble des victimes à l'intérieur des mines de houille en 1881, est la suivante (*) :

Tués.	14,0 p. 100
Blessés.	2,5 —
Ensemble.	3,8 —

(*) D'après les chiffres donnés dans la *Statistique de l'industrie minérale pour l'année* 1881.

NOTE

SUR L'EXPLOSION D'UN BOUILLEUR

DANS UNE SCIERIE A BOIS, A VIERZON (CHER)

Extrait du rapport de M. l'ingénieur des mines de Grossouvre.

Le générateur qui a fait explosion, établi suivant le système Farcot, se composait d'une chaudière horizontale de $4^m,40$ de longueur et de $0^m,90$ de diamètre, et de deux bouilleurs-réchauffeurs latéraux de $4^m,40$ de longueur et de $0^m,60$ de diamètre, établis verticalement l'un au-dessus de l'autre : il était timbré à 6 kilog.

Le foyer se trouvait sous la chaudière, dont la moitié inférieure seulement était exposée à l'action des flammes; les produits de la combustion venaient ensuite chauffer le bouilleur supérieur, puis le bouilleur inférieur et arrivaient ensuite à la cheminée. Le chauffage avait lieu habituellement avec les débris de bois provenant du travail de la scierie.

L'eau d'alimentation, refoulée par une pompe dans le bouilleur inférieur, traversait ensuite le bouilleur supérieur pour se rendre enfin dans la chaudière par un tube recourbé en forme de siphon qui plongeait à environ $0^m,10$ du fond de celle-ci : elle rencontrait donc des gaz d'une température plus élevée à mesure qu'elle s'échauffait.

Dans les diverses visites faites par le service des mines, il fut constaté que l'appareil était bien conduit, entretenu avec soin, et que la pression de marche était toujours inférieure de 1 ou 2 unités au numéro du timbre.

L'explosion du bouilleur supérieur s'est produite le 29 décembre 1882, quelques instants après que le chauffeur venait de quitter la chaudière pour aller chercher des débris de bois.

Ce bouilleur se composait de deux viroles assemblées par des lignes de rivures simples à superposition, fermées à l'avant par un bouchon en fonte où se trouvait l'autoclave, et à l'arrière par une calotte en tôle.

Il s'est rompu en trois fragments : le premier, comprenant le bouchon de fonte et une petite portion de la tôle de la première virole, ayant en gros une forme triangulaire ; le deuxième, une partie de la première virole ayant la forme trapézoïdale ; le troisième, la deuxième virole ouverte suivant la ligne de rivure longitudinale et à laquelle restèrent assemblées la calotte du fond postérieur et la troisième partie de la première virole ayant une forme triangulaire.

Le premier fragment fut projeté en avant, à environ 20 mètres ; le second est tombé à l'avant du massif de la chaudière, et le troisième à l'arrière.

Le bouilleur inférieur est resté en place, conservant la tubulure de communication avec le bouilleur supérieur ; la chaudière, projetée latéralement, est tombée à peu près à 4 mètres de l'emplacement qu'elle occupait, dans une position sensiblement parallèle à sa position primitive.

Il n'y a eu aucun accident de personnes, et les dégâts matériels, peu importants, ont consisté dans la destruction du massif du fourneau et de la toiture qui le recouvrait (la plus grande partie des matériaux ainsi déplacés, retombés sur place sans se briser, ont pu être utilisés pour la reconstruction), dans le renversement d'un mur latéral auquel était appuyé le massif du fourneau, et dans celui de la cheminée, haute de 15 mètres, dont le soubassement est resté intact sur une hauteur de $2^{m},50$.

D'après les déclarations du propriétaire et du chauffeur, au moment de l'explosion, l'eau était à son niveau normal

et la pression indiquée par le manomètre n'était que de 3 kilog.

Nous pensons qu'il y a lieu d'accepter ces assertions, car s'il y avait eu abaissement du niveau de l'eau, d'après la disposition de l'appareil, la chaudière seule eût été atteinte, et s'il y avait eu excès de pression, il en serait certainement résulté dans la marche du mécanisme des anomalies qui auraient attiré l'attention du personnel de l'atelier. Il convient, d'ailleurs, de remarquer que les effets matériels de l'accident auraient eu alors un tout autre caractère ; sous l'influence d'une pression élevée, les fragments de la chaudière eussent été projetés à de grandes distances, et, tout autour d'elle, les bâtiments rasés au niveau du sol et leurs débris également projetés au loin ; dans le cas actuel, il y a eu peu de dégâts matériels, et pas de projection, puisque les fragments du bouilleur sont pour ainsi dire retombés sur place, à l'exception du bouchon antérieur qui a été lancé comme un projectile à la distance relativement faible d'une vingtaine de mètres.

Il faut donc exclure, dans la recherche des causes de cet accident, l'excès de pression, l'alimentation intempestive après un abaissement du niveau de l'eau, puisque le chauffeur était absent et, pour la même raison, une production subite de vapeur, comme il s'en produit quelquefois après une période de repos, lorsque la machine est remise en marche.

Les tôles avaient conservé partout leur épaisseur primitive, mais l'examen de leurs surfaces de déchirure attira notre attention par leur aspect grenu et cristallin, qui dénotait un métal de très médiocre qualité ; en outre, dans toutes les parties où les tôles présentaient des bosses un peu fortes, on observait des cassures et des gerçures.

Nous fûmes ainsi amené à suspecter la qualité du métal et, pour mieux l'examiner, nous fîmes détacher un fragment qui se trouvait découpé en partie par une déchirure

sur le bord d'une des tôles. Trois ouvriers, agissant avec une grande barre de fer comme levier, travaillèrent pour augmenter cette déchirure; elle s'ouvrit d'abord très lentement, puis subitement le métal céda sur une longueur de 15 à 20 centimètres, sans se ployer, et se brisa brusquement comme une matière cassante. Sur la petite partie de la déchirure qui avait d'abord résisté, le métal montrait du nerf, et, sur le reste, un grain brillant mélangé de très peu de nerf, il paraissait mal soudé et offrait une structure schisteuse.

Nous avions donc affaire à un métal de très médiocre qualité : mal travaillé, mal soudé, aigre et cassant.

Pour nous rendre compte d'une manière plus précise de la nature du métal, nous fîmes découper, dans diverses parties de la chaudière, un certain nombre de languettes, qui, aux essais par traction, nous donnèrent les résultats suivants :

La limite d'élasticité variait de 22 à 28 kilog., la ténacité de 26 à 32, et l'allongement de rupture de 1,7 à 3,77 p. 100.

Ces résultats indiquent un métal de résistance ordinaire et possédant très peu d'allongement de rupture, c'est-à-dire un métal aigre et cassant.

En général, dans les fers et les aciers la limite d'élasticité est très sensiblement la moitié de la limite de rupture; dans le cas présent, ces deux quantités sont très rapprochées, ce qui dénote un métal fatigué.

Ces défauts indiquent nettement la cause de l'explosion ; la résistance moyenne des tôles, quoique très ordinaire, était largement suffisante pour résister à la pression normale de la chaudière et même à une pression bien supérieure; mais on comprend qu'un appareil soumis à des efforts incessants de contraction et de dilatation et construit avec un métal aigre, peut arriver à se briser, sans qu'il y ait lieu de faire intervenir aucune cause anormale;

dans ces conditions, il participe, en quelque sorte, à la fragilité d'une feuille de verre, qui résiste bien à une pression assez élevée, s'exerçant d'une manière continue sur sa surface et qui se brise sous le moindre choc; les métaux aigres sont, si l'on peut s'exprimer ainsi, des métaux fragiles, destinés fatalement à se rompre sous l'influence de mouvements brusques.

Cet accident montre combien il importe aux constructeurs de se rendre compte des qualités des tôles qu'ils emploient, et combien ils doivent rechercher la douceur du métal.

Il ne suffit pas, ainsi que beaucoup se le figurent, que le métal supporte bien le travail de construction, et qu'il résiste à l'épreuve réglementaire d'une pression double de celle de sa marche normale ; la charge des tôles, quelque médiocres qu'elles soient, reste toujours, dans ces conditions, bien inférieure à la limite d'élasticité.

On peut donc dire, sans craindre d'émettre une opinion paradoxale, que les constructeurs n'ont pas à se préoccuper de la résistance, mais qu'ils doivent s'attacher avant tout à employer des tôles douces, possédant un grand allongement, susceptibles de fournir des appareils doués d'une élasticité suffisante pour résister aux mouvements de dilatation et de contraction auxquels ils seront soumis.

Des essais par traction pour mesurer la ténacité et la ductilité du métal, certainement très utiles, ne sont cependant pas indispensables; des expériences pratiques, par ployage, emboutissage et poinçonnage, pouvant se faire sur les rognures de tôles et susceptibles d'être exécutées par tous les ouvriers employés dans les ateliers de chaudronnerie, sont suffisantes pour renseigner le constructeur sur la qualité des métaux qu'il met en œuvre.

Dans les ateliers importants seuls, il y aurait, au contraire, tout avantage à faire procéder à une réception spéciale à l'usine même; cette mesure est d'autant plus facile à

appliquer, qu'il existe près de toutes les grandes usines des agents réceptionnaires, très experts dans la connaissance des métaux, qui pourraient être chargés de ce travail par les constructeurs.

Cette question a du reste attiré tout récemment l'attention des associations allemandes pour la surveillance des appareils à vapeur, et leur syndicat a fait connaître l'ensemble des conditions qu'il y avait lieu d'exiger des tôles destinées à la construction des chaudières.

Ces conditions, au point de vue des essais par traction, sont résumées dans le tableau suivant, pour des barrettes de $0^{m},150$ de longueur.

	TÔLES		
	de corps.	d'emboutissage.	de coup de feu.
Résistance à la rupture, sens du laminage.	33 kilog.	35 kilog.	36 kilog.
Allongement, sens du laminage.	7 p. 100	12 p. 100	18 p. 100
Résistance à la rupture, sens perpendiculaire au laminage.	30 kilog.	33 kilog.	34 kilog.
Allongement, sens perpendiculaire au laminage.	5 p. 100	8 p. 100	12 p. 100

Les échantillons doivent pouvoir être pliés sans présenter de fentes apparentes sur la partie convexe, dans les conditions données par le tableau suivant où les angles sont indiqués en degrés.

ÉPAISSEUR en millimètres.	CORPS		EMBOUTISSAGE		COUP DE FEU	
	parallèle au laminage.	perpendiculaire au laminage.	parallèle au laminage.	perpendiculaire au laminage.	parallèle au laminage.	perpendiculaire au laminage.
6 - 7	50°	30°	80°	50°	110°	90°
8 - 8	45	25	70	40	100	80
10 - 11	40	20	60	35	90	70
12 - 13	35	15	50	30	80	60
14 - 15	30	12	40	25	75	50
16 - 17	25	10	35	20	70	40
18 - 19	20	8	30	15	65	35
20 - 21	15	5	25	10	60	30

Enfin, les tôles doivent supporter, au rouge, sans déchirures, un forgeage au marteau qui puisse faire subir à l'échantillon d'une largeur de $0^m,10$ environ, dans le sens perpendiculaire au laminage, un élargissement égal à une fois et demie la largeur primitive, et un poinçonnage fait à une distance du bord égale à la moitié de l'épaisseur de la tôle (*).

En résumé, on ne saurait trop insister sur ce point et appeler l'attention des constructeurs sur la responsabilité qu'ils encourent en faisant usage de tôles dont ils n'ont pas vérifié les qualités : l'exemple de l'explosion de Vierzon vient, à la suite de bien d'autres, démontrer que l'emploi des tôles aigres présente les plus grands dangers.

ANNEXE AU RAPPORT.

Note sur l'essai des tôles du bouilleur qui a fait explosion à Vierzon.

Les essais par traction ont été faits dans les ateliers de la fonderie de canons de Bourges, avec les machines d'épreuve, qui y sont installées pour le contrôle des aciers fournis par l'industrie. Elles consistent essentiellement en une presse hydraulique, qui produit l'effort de traction dont la tension est mesurée par un manomètre.

Les éprouvettes sur lesquelles on opère ont, dans les essais faits par l'artillerie, une longueur de 10 centimètres entre les traits de repère, afin d'avoir des résultats comparables; pour mesurer les allongements, qui ne sont que de petites fractions de millimètres, on se sert d'un appareil

---

(*) Extrait du *Portefeuille économique des machines*, avril 1883.

à vis micrométriques, muni de lunettes à réticules; cet appareil se compose d'un chariot portant les deux lunettes et pouvant se déplacer parallèlement à l'éprouvette au moyen d'une vis micrométrique; une des lunettes est fixe sur le chariot, et l'autre mobile au moyen d'une vis également micrométrique. Au commencement de l'expérience, on déplace le chariot de manière à viser l'un des traits avec la lunette fixe, et au moyen de la vis on amène l'autre sur le second trait; on vérifie ainsi la distance des repères. Pendant l'étirage, on suit le premier trait avec la lunette fixe et le second avec la lunette mobile : la graduation des tambours de la vis micrométrique de cette dernière indique l'allongement de l'éprouvette entre les repères.

Le nombre des barrettes éprouvées a été de huit; les barrettes I, V et VII ont été prises dans le sens longitudinal, c'est-à-dire dans le sens des génératrices; elles devraient donc être théoriquement de direction perpendiculaire au laminage, mais il est possible qu'en fait, elles ne le soient pas, les usines livrant les tôles découpées aux dimensions d'emploi; les résultats des épreuves semblent plutôt confirmer cette dernière hypothèse.

Les barrettes III, VI et VIII sont de direction perpendiculaire aux trois premières, et les deux autres, II et IV, ont été prises le long d'une ligne de déchirure.

NUMÉROS des barrettes éprouvées.	LONGUEUR		LARGEUR		ÉPAISSEUR		ALLONGEMENTS sous des charges de			
	avant l'épreuve.	après l'épreuve.	avant l'épreuve.	après l'épreuve.	avant l'épreuve.	après l'épreuve.	1^{T},0	1^{T},2	1^{T},4	1^{T},6
	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.	mm.			
I	0,095	0,0973	0,012	0,0118	0,0085	0,0083	0,07	0,11	0,13	0,14
II	0,090	0,0934	0,012	0,0117	0,0098	0,0095	0,04	0,05	0,05	0,05
III	0,095	0,0969	0,012	0,0118	0,010	0,0098	»	»	»	»
IV	0,090	0,0932	0,012	0,0119	0,0096	0,0091	0,08	0,09	0,13	0,14
V	0,100	0,1029	0,012	0,0117	0,010	0,0098	0,02	0,03	0,04	0,04
VI	0,100	0,1017	0,012	0,0115	0,010	0,0099	0,02	0,03	0,03	0,06
VII	0,100	0,1031	0,0117	0,0115	0,0097	0,0094	0,03	0,04	0,06	0,08
VIII	0,100	0,102	0,012	0,012	0,0096	0,0094	0,06	0,08	0,10	0,13

NUMÉROS des barrettes éprouvées.	ALLONGEMENTS SOUS DES CHARGES DE (*suite*)												RUPTURE	
	1^{T},8	2^{T},0	2^{T},2	2^{T},4	2^{T},6	2^{T},8	3^{T},0	3^{T},2	3^{T},4	3^{T},6	3^{T},8	4^{T},0	Charge.	Allongement.
	mm.												T	millim.
I	0,15	0,16	0,18	0,19	0,25	0,45	0,87	»	»	»	»	»	2,4	2,30
II	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,07	0,17	0,51	1,04	2,18	»	3,8	3,40
III	»	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,25	1,04	»	»	3,0	1,90
IV	0,15	0,18	0,20	0,25	0,28	0,33	0,35	0,41	1,02	1,05	3,06	»	3,0	3,20
V	0,04	0,05	0,05	0,06	0,08	0,30	0,42	0,59	2,90	»	«	»	3,4	2,90
VI	0,08	0,12	0,14	0,15	0,16	0,18	0,33	0,73	«	»	«	»	3,3	1,70
VII	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,35	0,92	1,96	«	»	«	»	3,3	3,10
VIII	0,17	0,20	0,23	0,25	0,40	0,64	2,00	»	«	»	«	»	3,0	2,00

Les résultats de ces essais peuvent se résumer ainsi :

NUMÉROS des barrettes.	LIMITE d'élasticité.	TÉNACITÉ.	ALLONGEMENTS pour 100 à la rupture.
I	25,4	30,3	2,42
II.	26,3	32,3	3,77
III	27,5	30,0	2,00
IV	26,0	32,1	3,55
V.	21,6	28,3	2,90
VI.	24,1	27,5	1,70
VII	23,8	29,1	3,10
VIII.	21,7	26,0	2,00

Les différences assez notables, qui existent entre ces divers résultats, peuvent s'expliquer non seulement pour les différences d'orientation, mais aussi et surtout par le défaut d'homogénité du métal, que nous avons constaté dans les surfaces de cassures.

Ce tableau montre que la limite d'élasticité est assez rapprochée de la ténacité, tandis que, dans les fers et les aciers, le premier chiffre est sensiblement la moitié du second.

Ainsi que nous l'avons indiqué précédemment, il faut en conclure que le métal était fatigué.

En effet, on sait que les allongements élastiques sont, même dans la période de déformation, sensiblement proportionnels aux charges; la limite d'élasticité est la charge sous laquelle commencent les allongements permanents, et à partir de laquelle les allongements totaux croissent rapidement.

Un métal qui a été étiré de manière que sa limite d'élasticité ait été dépassée se comportera donc, dans les essais par traction, comme un nouveau corps ayant une limite d'élasticité supérieure à la limite primitive, et précisément égale à la charge qui a produit la déformation; il en résulte, comme conséquence nécessaire, la diminution de l'allongement de rupture.

Le rapprochement de la limite d'élasticité et de la ténacité indique donc un métal fatigué, et ce résultat peut être obtenu par diverses opérations physiques, et, pour une tôle de chaudière, par un coup de feu.

Dans le cas présent, il y a lieu, comme nous l'avons montré, de rejeter cette dernière cause, et il est naturel d'admettre que l'altération s'est produite, en raison de l'aigreur des tôles, dans l'opération du cintrage qu'elles ont eu à subir.

Avis de l'ingénieur en chef.

M. l'ingénieur en chef Orsel est d'avis qu'on ne saurait trop recommander aux fabricants de chaudières l'essai des tôles qu'ils emploient et appeler leur attention sur ce fait que l'élasticité et la ductilité du métal sont des qualités aussi importantes que sa ténacité.

Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.

La Commission centrale, dans sa séance du 31 juillet 1883, a émis l'avis suivant, proposé par M. l'ingénieur en chef Luuyt, rapporteur :

« La rupture d'un bouilleur survenue le 29 décembre 1882, à Vierzon, est due en grande partie à la mauvaise qualité de la tôle, très aigre et cassante. L'ingénieur des mines n'ayant eu connaissance de cet accident qu'à plusieurs mois de sa date, l'enquête n'a pas pu mettre en évidence les causes accessoires.

« Il y aurait lieu de publier dans les *Annales des Mines* un extrait du rapport de M. de Grossouvre, notamment la partie qui concerne les essais à effectuer dans les ateliers sur les tôles employées à la construction des générateurs de vapeur. »

NOTE

SUR

L'EXPLOSION D'UNE CHAUDIÈRE VERTICALE

AUX FORGES DE MARNAVAL

(HAUTE-MARNE)

La Commission centrale des machines à vapeur a proposé que l'explosion d'une chaudière verticale, survenue le 31 mars 1883 aux forges de Marnaval, fît l'objet d'une insertion aux *Annales des Ponts et Chaussées* et aux *Annales des Mines.* L'extrait suivant du rapport de M. l'ingénieur en chef Trautmann rend compte de cet accident.

Extrait du rapport de M. l'ingénieur en chef Trautmann.

La forge de Marnaval est située entre la route de Joinville à Saint-Dizier et la Marne, dont une dérivation sert de force motrice à l'usine. Elle forme un rectangle de 120 mètres de long, de l'est à l'ouest, sur une profondeur de 90 mètres : la toiture est une charpente recouverte de tuiles et se compose de cinq travées. Sous cette halle, se trouvent à chaque extrémité un train de fer brut avec les fours à puddler et une machine à vapeur de 65 chevaux pour chaque train. Au milieu, sont installés le train spé-

cial, le train feuillard et le train machine, avec les fours à réchauffer. Ces différents trains sont actionnés par deux turbines de 80 chevaux chacune et par deux machines à vapeur de 60 et de 150 chevaux. La forge comprend encore un atelier de réparation, desservi par une machine de 25 chevaux, quatre marteaux-pilons de 10 chevaux chacun et trois cisailles de 10 chevaux chacune également.

Pour fournir la vapeur à toutes ces machines, l'usine renferme dix-sept chaudières, dont neuf verticales et huit horizontales, savoir :

A l'est, cinq chaudières verticales (n°s 5, 6, 7, 8 et 9. Pl. VII, *fig.* 3) chauffées par les fours du puddlage n° II; au milieu huit chaudières horizontales (n° 1 à 8), groupées deux à deux et chauffées par les flammes des fours à réchauffer; à l'ouest, quatre chaudières verticales (n° 1, 2, 3, 4,) chauffées par les fours du puddlage n° I.

C'est l'eau de la Marne qui alimente toutes ces chaudières : elle est puisée dans le canal de dérivation de la forge par une pompe spéciale et envoyée dans un appareil réchauffeur, auquel aboutissent les tuyaux d'échappement des machines. Une deuxième pompe, mue par une turbine, la prend dans ce réchauffeur, à la température de 80° environ, et la refoule dans une conduite générale, de 17 centimètres de diamètre, qui s'appuie, le long de l'usine, contre la rangée de poteaux qui sépare la première travée de la seconde, au midi. De cette conduite partent des branchements spéciaux qui aboutissent à chaque chaudière, par le trou d'homme du bas pour les chaudières verticales, et par celui du bouilleur inférieur pour les chaudières horizontales.

La pompe qui refoule l'eau dans la conduite fonctionne toujours, et quand elle donne plus d'eau qu'il n'est nécessaire pour l'alimentation des chaudières, l'excédent se déverse, au moyen d'une soupape chargée, dans un réservoir placé dans les combles, qui, au moyen d'une troisième pompe, mue également par la turbine, reçoit l'eau de la

Marne pour être amenée dans les bâches placées à côté des fours pour le service de l'usine, pour refroidir les trains et outils, etc. Immédiatement avant son entrée dans chaque chaudière, le tuyau d'amenée d'eau porte un clapet de retenue et une vanne qu'on manœuvre au moyen d'un petit volant. Cette vanne sert à régler l'introduction de l'eau. Tout branchement particulier porte, de plus, une seconde vanne destinée à isoler, en cas de besoin, la conduite d'une chaudière quelconque de la conduite générale d'alimentation.

Pour parer à l'éventualité d'un dérangement ou d'un accident empêchant la pompe de fonctionner, chaque chaudière est munie d'un injecteur aspirant dans un tonneau l'eau qui y est amenée, au moyen de tuyaux, du réservoir indiqué plus haut.

Un ouvrier spécial, appelé alimenteur, est uniquement occupé à surveiller les flotteurs et les niveaux d'eau et à manœuvrer en conséquence les vannes réglant l'alimentation; quand il trouve deux fois de suite le flotteur d'une chaudière à la même position, il doit le palper pour s'assurer de son bon fonctionnement. L'alimenteur, qui surveille aussi la pression, est placé sous le contrôle d'un contremaître qui vérifie également les niveaux d'eau; tous deux sont sous les ordres d'un chef mécanicien.

Les chaudières verticales ne sont munies que d'un seul flotteur composé d'une meule en grès, pendue à l'extrémité d'un fil de laiton qui traverse le dessus de l'appareil au moyen d'un presse-étoupes ordinaire; une autre tige supportant le contre-poids est reliée à celle qui porte le flotteur par une chaînette glissant sur deux poulies. Flotteur et contre-poids sont guidés, et ce dernier glisse entre deux échelles graduées indiquant le niveau d'eau normal.

Du haut de chaque chaudière part un tuyau de huit centimètres de diamètre, muni d'un robinet qui débouche dans une conduite générale de quinze centimètres, régnant sur toute la longueur de la halle et fixée aux poteaux qui

séparent la deuxième de la troisième travée du hallage, à partir du midi ; c'est elle qui, au moyen de branchements, envoie la vapeur à toutes les machines.

Tel était l'ensemble des dispositions, pour ce qui concerne les appareils à vapeur, quand eut lieu l'explosion du 31 mars.

La chaudière verticale n° 5, placée dans l'extrémité est de la forge, fit explosion à huit heures du matin, quelque temps après le changement de poste des ouvriers, et quand la machine du puddlage n° II était arrêtée. Elle s'est divisée, à partir de 2^{m},20 environ du bas, en un assez grand nombre de morceaux qui ont été lancés dans toutes les directions ; la maçonnerie entourant la chaudière a été projetée avec violence, et par suite de ces projections et de la grande production de vapeur, la toiture et la charpente de la halle ont été emportées et disloquées sur environ 900 mètres carrés de surface ; les conduites d'eau, de vapeur, ont été brisées, ployées, et à la vapeur de l'explosion venait encore s'ajouter celle des autres chaudières, la grande conduite de vapeur ayant été rompue à l'endroit de l'explosion. Autour de cette irruption de vapeur et de poussières brûlantes et sous une avalanche de briques, de tuiles, de débris de charpente, de fer, de fonte, se trouvaient réunis près de cent ouvriers au moment de reprendre leur travail journalier.

Le sauvetage a été immédiatement organisé par M. Defert, directeur de l'usine ; il s'est opéré dans des conditions très difficiles au milieu d'un nuage formé par la poussière soulevée et par l'énorme quantité de vapeur s'échappant de la conduite générale communiquant avec toutes les chaudières ; cependant, au bout de dix minutes, on parvint à fermer tous les robinets de prise de vapeur des chaudières. A onze heures, on avait la certitude qu'il ne restait plus personne sous les décombres.

Dix-sept personnes ont été trouvées mortes, la plupart

affreusement brûlées, et les membres ou la tête fracassés ; elles furent déposées dans un des bureaux de l'usine. Trente-six, gravement atteintes, principalement brûlures et fractures compliquées, furent transportées à Saint-Dizier, quatorze à l'asile des aliénés, et vingt-deux à l'hospice, pour y être soignées ; trente-huit, moins gravement blessées, furent amenées à leur domicile à Marnaval. A l'hospice, six succombèrent le 1er avril, et le même jour un des blessés de l'asile. Quant aux blessés traités à domicile, deux succombèrent le soir même du 31 mars, et un le 1er avril. Une dernière victime, morte le 7 à l'hospice, vient s'ajouter à cette funèbre liste. En résumé, 28 morts et 63 blessés plus ou moins grièvement, dont quelques-uns ne sont pas encore hors de danger (*), telle a été la terrible conséquence de l'explosion du 31 mars, sans parler des dégâts matériels.

Il résulte des témoignages recueillis que tous les quinze jours chaque chaudière est piquée, nettoyée et goudronnée pour empêcher l'adhérence des dépôts. La chaudière qui a éclaté a été examinée les 25 et 26 mars, elle était en bon état, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur. Le flotteur indiquait 10 centimètres d'eau. La pression était de $5^k,50$ à $5^k,75$, le timbre des chaudières étant de 6^k. Les machines du puddlage étaient arrêtées, mais celles des fers marchands étaient en mouvement.

Nous joignons à ce rapport un plan de l'usine (Pl. VII, *fig.* 3) avec la désignation et l'emplacement des chaudières ; disons de suite qu'au moment de l'explosion, les chaudières horizontales nos 4 et 6 et la chaudière verticale n° 8 n'étaient pas en feu.

La chaudière n° 5 a un diamètre intérieur de $1^m,10$ et une hauteur de 15 mètres. A $0^m,50$ de sa base elle porte un trou d'homme horizontal de $0^m,80$ de diamètre et de $1^m,00$

(*) A la date du rapport, 22 avril 1883.

de longueur; le sommet porte également un trou d'homme vertical de même diamètre et de $0^m,45$ de hauteur. Elle était entourée sur toute sa hauteur d'un fourneau en briques circulaire, laissant autour de la tôle un vide annulaire de $0^m,40$ à $0^m,50$ de largeur, dans lequel circulent les gaz chauds, qui arrivent dans le bas par trois carneaux ou conduits de flammes sortant de trois fours à puddler : un four double au nord (n° 13) et deux fours simples tournés vers le midi (n°s 14 et 15). Le four simple n° 15 n'était pas en feu le 31 mars.

Pour diriger les flammes venant de chaque four, l'espace annulaire entre la chaudière et le fourneau est divisé en trois compartiments au moyen de trois cloisons verticales en briques. Les cloisons situées de chaque côté du four n° 13 existent sur toute la hauteur de la chaudière ; celle qui sépare les deux fours simples ne s'élève qu'à $2^m,50$ de hauteur.

En haut, depuis la plate-forme jusqu'à $2^m,50$ en contre-bas, c'est-à-dire dans la partie formant réservoir de vapeur, la chaudière est entourée d'une chemise en briques de $0^m,11$ d'épaisseur, supportée par une couronne fixée à la chaudière pour la garantir du contact direct des gaz chauds.

Par suite de l'explosion, la partie formant le tiers supérieur a été projetée tout d'une pièce à une grande hauteur, et est venue s'aplatir en dehors de l'usine au point A du plan (*fig.* 3, Pl. VII), sur les rails d'un chemin de fer. Elle est composée de trois viroles, chacune de trois pièces. La dernière virole du bas a été arrachée à celle placée au-dessous, suivant un cercle horizontal dans le plan de la ligne des rivets (Voir le dessin de cette pièce, *fig.* 1).

Le bas de la chaudière portant le trou d'homme est resté en place et s'est séparé de la première virole sur la moitié de la circonférence dirigée vers le nord, d'abord en suivant la ligne des rivets de la première virole sur environ 80 centimètres; puis la déchirure s'est infléchie

vers le bas en pleine tôle, jusqu'à la partie supérieure de la pièce *a* dont il sera question ci-après et dont elle a suivi la rivure du haut, et elle s'est continuée en pleine tôle en descendant jusqu'au trou d'homme; cette moitié de virole a été brisée en deux morceaux, qui sont venus tomber non loin du four, l'un en B, l'autre en C. La moitié sud de la première virole ne s'est pas détachée complètement et est venue se rabattre sur les deux fours à puddler, où elle s'est encore fendue et trouée, par suite de son choc contre les armatures des fours. La *fig.* 2 donne le développement du bas de la chaudière et de la pièce rabattue. On y remarque deux réparations : la première, la pièce *b* mise en 1878, la seconde, la pièce *a*, ajoutée en 1882 à l'endroit du coup de feu.

Les deuxième, troisième et quatrième viroles ont été divisées en cinq morceaux et projetées en D, E, F, G et H (Voir le plan, *fig.* 3, Pl. VII). Nous avons mesuré partout les épaisseurs des tôles et l'écartement des rivets, aussi exactement que possible. D'après ces mesures, la partie inférieure et la première virole devaient être construites avec de la tôle de 13 millimètres d'épaisseur et le reste avec de la tôle de 11 millimètres. Les rivures sont faites dans les conditions ordinaires, c'est-à-dire que la tôle pleine, entre les rivets, est à peu près le double du diamètre des rivets. Nous ferons remarquer que les cassures horizontales ont eu lieu surtout suivant la ligne des rivets au haut de la première et de la quatrième viroles.

En examinant les débris de la chaudière, il est facile de voir qu'elle avait déjà subi plusieurs réparations et devait être vieille; nous avons déjà cité deux feuilles de tôle qu'on avait placées aux coups de feu; d'un autre côté, les rivures horizontales n'étaient pas toutes sur la même ligne; enfin, dans le bas et à la dernière virole du haut, les rivets étaient à tête conique, tandis qu'ailleurs ils étaient à tête plate ou bombée. Le trou d'homme du haut portait un

timbre de $5^{at},25$, sur lequel était inscrit encore « *Ordonnance du* 23 *mai* 1843 ». La chaudière remontait donc au delà de 1865; nous ne pûmes retrouver à l'usine de Marnaval aucun renseignement sur l'origine de la chaudière, et nous dûmes nous adresser à l'ancien propriétaire de Marnaval, qui avait acheté des chaudières de rencontre lorsqu'il construisit son usine.

En 1872, la société Jamin Bailly et Cie vendit à M. Royer-Houzelot, qui venait d'acquérir la forge de Marnaval, une ancienne chaudière verticale pour la somme de 702 francs; d'après une visite que je fis à Eurville, cette chaudière avait $1^m,10$ de diamètre et 14 mètres de hauteur, elle avait été construite en 1859 par M. Salarnier de Paris, éprouvée et timbrée d'abord pour $5^{at},50$; ce timbre fut réduit en 1861 à $5^{at},25$ pour unifier la pression dans toutes les chaudières de l'ancienne forge d'Eurville. M. Royer-Houzelot, ou peut-être même déjà MM. Jamin Bailly et Cie la firent sans doute allonger d'un mètre, d'autant plus que la dernière virole du haut, qui n'a qu'un mètre de hauteur, est faite avec de la tôle de qualité différente de celle du bas, et que les rivets sont à tête pointue, tandis qu'au-dessous ils sont à tête plate. Toujours est-il que M. Royer-Houzelot la fit éprouver à la forge de Marnaval le 22 mars 1873, pour le timbre de 6 kilogrammes, et la déclara le 12 décembre 1873. Un panneau de $2^m,20$ de hauteur sur $1^m,22$ de large fut placé en 1874 et une nouvelle épreuve fut faite le 10 avril 1874.

Deux autres réparations ont été faites ces dernières années à cette chaudière; nous en avons déjà parlé plus haut: 1° une pièce *a* rapportée à l'extérieur au nord à $1^m,30$ du fond, de $0^m,46$ de haut, $0^m,22$ de largeur et 13 millimètres d'épaisseur posée au commencement de 1882, ainsi qu'il résulte d'un procès-verbal d'épreuve du 4 avril 1882. La partie supérieure de cette pièce a été enlevée par l'explosion sur $0^m,12$ de longueur, le long de la rivure; 2° une

pièce *b* vers l'ouest, à $0^m,60$ plus haut que la précédente, de $0^m,90$ de long, $0^m,41$ de haut, avec 13 millimètres d'épaisseur ; la pose de cette pièce doit correspondre à une épreuve faite le 20 janvier 1878. L'explosion a déchiré l'ancienne pièce du bas suivant la ligne de l'axe des rivets de la pièce *b* sur une longueur de $0^m,90$, et, de là, la déchirure est allée rejoindre celle de la pièce *a*.

Quelles sont les causes certaines ou probables de l'explosion ?

Nous avons dit plus haut que, sur les dix-sept chaudières, quatorze seulement étaient en feu le 31 mars, et que les machines à vapeur des trains marchands, celles des cisailles, la pompe d'alimentation, marchaient au moment de l'explosion, la machine du puddlage n° I était également en mouvement depuis environ une heure ; seule la machine du puddlage n° II était arrêtée depuis une demi-heure environ, et le moment n'était pas encore venu de la faire marcher. Il arrive assez souvent qu'une chaudière éclate au moment où on met en mouvement la machine qu'elle alimente ; cela vient sans doute de ce que, en ouvrant rapidement le robinet de prise de vapeur placé sur la chaudière, on amène une forte dépression de la tension de la vapeur, d'un côté parce qu'il faut remplir non seulement le cylindre, le tiroir et les conduites, mais aussi parce que tous ces organes, quand ils ont eu le temps de se refroidir, fonctionnent au début comme de véritables condenseurs ; il y a alors une forte et brusque dépression dans la chaudière, et comme l'eau n'a pas perdu sa température, il se fait une véritable explosion intérieure qui souvent suffit pour rompre la chaudière. Mais une pareille cause ne nous paraît pas devoir être invoquée à Marnaval ; dans cette usine, les robinets de prise de vapeur sont placés sur les machines mêmes, à l'entrée dans les tiroirs, et, comme une seule conduite principale, communiquant avec toutes les chaudières, alimente les différentes machines,

les tuyaux amenant la vapeur à la machine sont toujours remplis et chauds; il en est de même des cylindres à vapeur des grandes machines, qui sont entourés d'une enveloppe où la vapeur circule, même quand elles sont arrêtées; la vapeur, avant d'arriver au tiroir, traverse cette enveloppe. Les effets dont nous venons de parler ne peuvent donc se produire; d'ailleurs, aucune machine n'était mise en mouvement au moment de l'explosion.

On ne peut attribuer l'explosion à un excès de pression, ou à des soupapes surchargées; comme toutes les chaudières communiquent entre elles pour la vapeur, il faudrait les surcharger toutes, ce qui n'existe pas. Chaque chaudière porte un manomètre partant de o, et par conséquent gradué en kilogrammes, et les indications de l'un de ces appareils ne peuvent pas différer beaucoup de celles d'un autre; or d'après la déposition du chef d'atelier, chargé de la direction des chaudières, le manomètre placé vis-à-vis de son bureau marquait $5^k,50$ à $5^k,75$ immédiatement avant l'explosion. Le haut de la chaudière n° 5 portait deux soupapes, dont l'une a été brisée en partie; mais nous avons pu vérifier la seconde, dont le bras de levier seulement était tordu. Le siège de la soupape avait un diamètre intérieur de $81^{mm},6$; la soupape et le levier pesaient $11^k,200$; les deux bras de levier avaient 77 et 670 millimètres de longueur; le poids suspendu au bout était de $29^k,500$. D'après ces poids et dimensions, la pression effective pour laquelle la soupape doit se lever est :

$$\frac{29,50 \times 670 + 11,20 \times 77}{5.229 \times 77} = 5^k,12.$$

Comme nous l'avons dit, la chaudière a été éprouvée pour une pression effective de 6 kilogrammes.

Il convient d'ajouter pourtant que, si la vapeur a une pression de 6 kilogrammes, par exemple, la partie inférieure de la chaudière verticale supporte une pression de

plus de 7 kilogrammes, par suite de la hauteur d'eau, qui normalement est de 12m,50. Nous reviendrons plus loin sur ce point; constatons pour le moment que la pression de la vapeur ne dépassait pas celle pour laquelle la chaudière a été éprouvée.

Quant à attribuer l'explosion à ce qu'on appelle une ébullition retardée, cette circonstance, qui d'ailleurs n'est pas généralement admise, ne peut être mise en avant à Marnaval, vu que la chaudière n° 5 n'a pas cessé un moment de rester sous feu, et que, de plus, elle a continuellement fourni de la vapeur.

La chaudière n'était-elle pas alimentée convenablement ?

Les dépositions des personnes que nous avons entendues concordent toutes à dire que le flotteur du n° 5 fonctionnait bien immédiatement avant l'accident, que la vanne d'alimentation était entr'ouverte et que l'eau se tenait un peu au-dessus de son niveau normal. Cette question est évidemment très grave, aussi avons-nous été plusieurs fois à Marnaval pour interroger de nouveau les ouvriers et employés et faire des recherches; nous n'avons rien découvert qui puisse nous autoriser à dire que la chaudière n'était pas alimentée. On a même dit que le flotteur était peut-être tombé au fond de la chaudière avant l'explosion, et que, par suite, ne fonctionnant plus, le contre-poids marquait constamment que la chaudière était pleine. En premier lieu, le flotteur a été projeté, au moment de l'explosion, contre le four à puddler à l'est, où il a été retrouvé à côté du clapet et du Giffard; s'il s'était détaché avant l'explosion, on l'aurait retrouvé sur le fond de la chaudière, qui n'a pas bougé. D'un autre côté, si le flotteur était tombé, il est assez facile de voir qu'il aurait dû se détacher depuis longtemps, et on s'en serait certainement aperçu avec la surveillance telle qu'elle est organisée à Marnaval.

Nous avons retrouvé la vanne d'alimentation de la chau-

dière n° 5 ; elle était entr'ouverte, mais comme le petit volant qui servait à la manœuvrer avait été brisé et la tige faussée, on ne peut à la rigueur dire qu'elle était entr'ouverte avant l'explosion ; toutefois, nous le croyons.

Il y a enfin un autre motif qui ne nous permet pas d'admettre le défaut d'alimentation : c'est l'énormité des projections et des dégâts causés. Quand une chaudière sous feu ne renferme pour ainsi dire que de la vapeur, la tôle rougit rapidement, et la moindre projection d'eau froide suffit pour faire fendre la tôle, non pas par suite d'une augmentation brusque de pression, mais bien par suite du contact de l'eau froide avec la tôle rougie. La vapeur contenue dans la chaudière s'échappe, mais elle cause rarement de grands dégâts ; c'est plutôt une détente, une dilatation brusque, qu'une véritable explosion, terme qu'il faudrait conserver pour les solides et liquides qui se transforment brusquement en vapeurs ou gaz, ou pour les gaz dans lesquels il se produit des réactions chimiques. La vapeur n'est pas explosive par sa nature ; elle se détend plus ou moins brusquement, elle brûle ce qu'elle rencontre sur son passage parce qu'elle contient beaucoup de chaleur latente, mais cause rarement de grands dégâts matériels, comme l'attestent plusieurs accidents que nous avons connus. Il en est tout autrement quand, dans une chaudière, il se trouve à la fois de la vapeur et de l'eau à haute température. Pour s'en rendre compte, il suffit de rechercher la quantité de calories qui est en jeu dans l'un et l'autre cas. En supposant la chaudière n° 5 pleine de vapeur à $5^k,75$, on a, pour le nombre de calories : $48,14 \times 656,50 = 31.604$ calories. Supposant la chaudière pleine d'eau jusqu'à $2^m,50$ au-dessous du sommet et le reste rempli de vapeur à $5^k,75$, et l'eau étant à la température de 165°, on aura, pour le nombre de calories, en admettant que l'eau ne renferme pas de bulles de vapeur : $11.875 \times 165 + 8,02 \times 656,50 = 1.984.640$ ca-

lories, c'est-à-dire plus de 63 fois plus de calories que dans le premier cas. En d'autres termes, le résultat final de l'explosion se traduit, dans le premier cas par 81 mètres cubes de vapeur à 1 atmosphère, et dans le second cas par 10 mètres cubes d'eau à 100 degrés et près de 2 700 mètres cubes de vapeur à une atmosphère. Ces calculs ne sont qu'approximatifs, mais ils suffisent néanmoins pour faire voir la grande différence : dans un cas de la vapeur qui se détend plus ou moins brusquement, et dans l'autre une énorme production de vapeur instantanément et de l'eau bouillante entraînée.

En résumé, en l'absence de toute preuve, et en présence des énormes dégâts matériels causés par l'explosion, nous ne pouvons admettre que la chaudière n'était pas alimentée.

Si on examine le plan de l'usine (Pl. VII, *fig.* 3), sur lequel sont indiqués les endroits où sont venus tomber les débris de la chaudière, on remarque qu'aucun des morceaux n'a été projeté vers le nord; le morceau H, au moment de la projection, faisait partie du morceau F, et ce n'est que quand ce dernier est tombé sur la bâche d'eau froide, que la feuille H en a été détachée par le choc, ainsi que l'indique sa cassure, et est venue tomber en H. Il y a d'ailleurs d'autres feuilles qui portent des fissures et même des trous qui se sont produits au moment où la masse projetée est venue s'abattre sur des corps durs, tels que les rails, les bâches ou les armatures des fours.

Il est donc probable que la fissure initiale de la tôle a eu lieu dans la partie nord de la chaudière. Nous avons dit plus haut que dans le bas de la chaudière on apercevait, dans la tôle, des coups de feu aux endroits où la flamme sortant des fours vient frapper la chaudière (points α et β de la *fig.* 2). Ces coups de feu ne sont pas produits pour la première fois sans doute, puisqu'on a été obligé de placer des morceaux de tôle à ces endroits, et notamment en 1882

où on a posé la pièce *a*. A Marnaval, les chaudières sont visitées, nettoyées et goudronnées tous les quinze jours; celle n° 5 l'avait été le 25 mars. Le 31, toute la partie supérieure de la chaudière, c'est-à-dire celle au-dessus de la virole du fond était propre, et ne portait aucune incrustation ni dépôt, mais il n'en était pas tout à fait de même de la virole du fond. A partir de la hauteur des coups de feu, la tôle était recouverte d'une incrustation de 1 millimètre à $1^{mm},5$ d'épaisseur; cette épaisseur allait en augmentant à mesure qu'on descendait; peu adhérente dans le haut, elle devenait plus difficile à détacher dans le bas. La pièce *a*, placée en 1882, longue et peu large, était également recouverte, vers son milieu, d'une couche de peu d'épaisseur, mais comme cette pièce avait été ajoutée extérieurement, elle formait une espèce de poche à l'intérieur, au milieu de l'ancienne tôle, et c'est vers les bords de ce creux que le dépôt atteignait près d'un centimètre d'épaisseur, et était très adhérent. Extérieurement, et surtout vers le haut, cette pièce *a* était fortement brûlée et oxydée.

C'est en cet endroit que, d'après nous, s'est faite la déchirure initiale, grâce au recouvrement, et peut-être à l'incrustation, qui ont permis à la tôle d'être surchauffée et rougie sous l'action d'un violent coup de feu, d'où des variations brusques de dilatation qui suffisent pour fissurer de la tôle déjà altérée antérieurement. Le bourrelet de tartre a pu augmenter un peu la zone d'action du coup de feu, mais il n'est pas la cause initiale. Quand il y a une pièce rapportée à l'extérieur, on laisse ordinairement, dans le pourtour intérieur, se déposer ce bourrelet, de crainte qu'en l'enlevant avec le ciseau et le marteau, on ne facilite les fuites par le matage. En général ce bourrelet n'a guère d'inconvénients, pourtant on ne devrait pas le laisser subsister à l'endroit des coups de feu; d'un côté, il facilite l'action destructive de ce dernier, et d'un autre côté, pendant le nettoyage de la chaudière, il empêche de recon-

naître les petites fissures qui peuvent exister derrière lui.

D'après nous, la déchirure initiale a eu lieu le long des rivets de la partie supérieure de la pièce *a* qui aurait été surchauffée. La pression en ce point, au moment de l'explosion, devait être de 7 kilogrammes environ. Sous cette pression et le brusque dégagement d'eau et de vapeur, la déchirure s'est prolongée à droite, à gauche et en haut de l'ancienne pièce de tôle. Cette pièce avait évidemment reçu un ou plusieurs coups de feu, on s'était contenté de la remplacer sur une petite surface, au lieu de la remplacer en entier, et les fuites ont pu facilement se propager dans cette pièce déjà altérée. La déchirure verticale s'est prolongée sur toute la génératrice de la première virole, et les deux quarts de cylindre de chaque côté de cette fente (pièces B et C) se sont ouverts comme les deux battants d'une porte, et ont été projetés l'un à l'est, l'autre à l'ouest, tandis que le demi-cylindre, du côté du midi, a été rabattu sur les fours à puddler, par suite de la réaction de la vapeur s'échappant vers le nord. Les 2e, 3e et 4e viroles ont été projetées à peu près de même, tandis que le haut, définitivement séparé du bas, a été lancé verticalement en l'air. Les briques du fourneau ont été semées dans toutes les directions, mais principalement vers le nord, par suite du jet initial de vapeur qui est venu les frapper.

On peut se demander si la vétusté de la chaudière n'est pour rien dans l'accident. Nous avons dit qu'elle avait été construite par Salarnier, de Paris, en 1859, et timbrée sous le régime de l'ordonnance de 1843, pour cinq atmosphères et demie. D'après cette ordonnance, l'épaisseur de la tôle, pour pouvoir être timbrée à cette pression, est de 12 millimètres; c'est, en effet, l'épaisseur moyenne de la tôle de la chaudière n° 5 : 11 millimètres dans le haut et la partie moyenne et 13 dans le bas. Le décret de 1865 ayant supprimé les épaisseurs obligatoires, la chaudière fut essayée

et timbrée à 6 kilogrammes en 1873, après réparation. Les constructeurs admettent généralement aujourd'hui, pour la tôle, le coefficient de rupture de 36 kilogrammes par millimètre carré ; on réduit ce coefficient à 40 p. 100 pour la résistance de la rivure, et on en prend le quart pour déterminer l'épaisseur de la tôle. Pour le timbre de 6 kilogrammes, l'épaisseur de la tôle pour la chaudière serait :

$$\frac{110 \times 00,06}{2 \times 3,6} \text{ ou } 9,17 \text{ millimètres.}$$

Pour la partie inférieure il faudrait compter 7 kilogrammes, ce qui donne 10 millimètres; en somme, d'après ces bases généralement admises, l'épaisseur serait suffisante. Quant à la nature de la tôle, la chaudière est en fer au bois, à l'exception de la virole du haut, de 1 mètre de hauteur, qui est de la tôle au coke. Le fer, tout en étant au bois, présente en plusieurs points des lits minces et ternes de scories, ce qui peut le rendre un peu cassant. Partout ailleurs qu'aux coups de feu, la tôle nous a paru saine et à surface lisse ; enfin la chaudière a été éprouvée en 1882, au mois d'avril. Nous ne croyons donc pas devoir attribuer l'explosion à l'usure ou à la vétusté de l'appareil; il convient pourtant d'ajouter que les chaudières verticales doivent s'user plus vite que les chaudières horizontales; leur partie inférieure a de bien plus fortes charges à supporter que le haut, et, en général, on n'en tient pas assez compte dans la construction de ces chaudières. D'un côté, n'étant pas supportées latéralement, le bouillonnement de l'eau, qui quelquefois est très vif, doit leur faire subir des trépidations, des oscillations, qui doivent fatiguer beaucoup la chaudière, surtout les rivures inférieures. D'un autre côté, ces rivures ont à supporter non seulement la pression de l'eau et de la vapeur, mais aussi le poids des tôles supérieures et de la maçonnerie qui entoure le réservoir de vapeur, et qui, dans le cas actuel, ne représente pas moins de 110 kilogrammes par

rivet d'une rivure horizontale. Les rivures inférieures devraient donc toujours être faites à deux rangs de rivets à l'endroit des coups de feu.

L'accident pouvait-il être évité? Nous le croyons.

Le haut de la pièce ajoutée *a* constituait évidemment ce qu'on peut appeler un point critique. En premier lieu, petite pièce rapportée avec rivure à l'endroit du coup de feu ; en second lieu, la flamme du four n° 13 venait frapper la chaudière de face et sous un angle de plus de 45 degrés; enfin, il y a une troisième cause qu'il convient de signaler : pendant la durée d'un puddlage, la température du four n'est pas toujours la même, il y a des moments où ce travail demande moins de chaleur qu'à d'autres; d'un autre côté, entre deux opérations de puddlage, il y a un arrêt pendant lequel le feu tombe, et puis on le relève brusquement; enfin, il y a toutes les douze heures, par suite du changement de postes, pour ainsi dire une suspension de travail, pendant laquelle la température du four peut descendre jusqu'à 400 ou 500 degrés, et puis brusquement le nouveau poste arrive, elle est portée à 1000 degrés et plus, et c'est précisément pendant une de ces suspensions que l'explosion a eu lieu. Avec les dispositions adoptées à Marnaval, la chaudière subit directement l'influence fâcheuse de ces variations rapides de température, d'où fréquence de coups de feu, variations brusques de dilatation et contraction, et puis fissure de la tôle principalement aux rivures, et enfin, si on n'y porte remède à temps, explosion. Cette dépendance entre le chauffage des chaudières et le chauffage des fours est un des grands inconvénients des chaudières verticales; le chauffeur du four conduit son feu seulement en vue du travail du puddlage, sans s'occuper des besoins ou des exigences d'un chauffage rationnel de la chaudière à vapeur. Dans les fours à réchauffer, la température est en général plus élevée que dans ceux à puddler; aussi à Marnaval a-t-on

fait suivre ces fours de chaudières horizontales, et pour celles-ci les inconvénients signalés ci-dessus sont bien moindres que pour les verticales, d'un côté parce que la flamme arrive toujours tangentiellement à la surface de la chaudière et des bouilleurs, et d'un autre côté, parce que, entre le four et celle-ci, se trouve une espèce de chambre qui sert de régulateur. Nous croyons qu'à Marnaval il y a bien peu de chaudières verticales placées dans les conditions du n° 5, qui n'aient des pièces rapportées à l'endroit du coup de feu, lesquelles doivent être remplacées fréquemment. Lors de l'accident, sur les trois fours qui entouraient la chaudière n° 5, deux seulement étaient en feu, le four double n° 13 et le four simple n° 14; cette circonstance a-t-elle pu faciliter ou favoriser l'explosion? nous ne pouvons l'affirmer; car sous le rapport de la transmission de la chaleur dans la tôle, cette chaudière se trouvait dans les mêmes conditions qu'une chaudière horizontale ordinaire, dont on ne chauffe que les 2/3 de la surface, et cela n'a aucun inconvénient; d'ailleurs, à Marnaval, les carneaux des fours 14 et 15 n'étaient séparés par une cloison que sur une hauteur de 2^{m},50 à partir du fond, c'est-à-dire dépassant les rampants de 1 mètre seulement environ.

L'explosion de Marnaval n'est pas la première de ce genre; il y a eu des explosions de chaudières verticales chauffées par les flammes des fours, notamment aux forges de Clairvaux (Aube) en 1873, et aux forges de Commentry en 1874, qui ont eu des suites presque aussi désastreuses que celles de Marnaval.

L'Administration des Mines, émue de ces graves accidents, a provoqué une enquête dont les résultats ont été transmis à la Commission centrale des machines à vapeur, qui a fait insérer dans les *Annales des Mines* (tome XIV, 4e livraison de 1878), le rapport fait sur cette question par M. Hanet-Cléry, et dont la Commission a adopté les conclusions.

De ces conclusions nous citerons ici seulement les suivantes :

1° Protection des parties des chaudières situées en face du rampant, par l'établissement d'un revêtement en maçonnerie réfractaire éloigné de 8 à 10 centimètres au moins de la surface des tôles;

2° Des réparations convenablement exécutées et bien surveillées, en évitant de procéder par petites pièces rapportées.

Si ces sages conseils avaient été suivis à Marnaval, nous sommes convaincu que l'explosion eût été évitée, car ce n'est pas, à notre avis, à un défaut de surveillance qu'est dû l'accident, mais bien à une installation et à un état de choses défectueux; nous avons indiqué plus haut les trois causes principales qui ont amené l'explosion; en remplaçant d'un côté en entier, en 1882, la feuille du coup de feu qui avait été altérée, au lieu d'y rapporter une petite pièce, et en construisant, d'un autre côté, le mur de défense, on faisait disparaître ou on atténuait autant que possible les dangers signalés.

A la suite de l'accident de Marnaval, l'Administration examinera s'il ne convient pas de transformer en prescriptions obligatoires les mesures indiquées ci-dessus par la Commission centrale des machines à vapeur : 1° remplacement de la feuille entière du coup de feu quand celle-ci est altérée en partie seulement; 2° construction d'un mur de défense entre le four et la chaudière, ce mur dépassant d'un mètre environ le rampant du four.

Comme à Marnaval les chaudières verticales sont toutes chauffées par deux ou trois fours, il serait préférable d'entourer la chaudière d'une tourelle. D'un autre côté, comme, malgré la tourelle, la tôle doit, dans chaque visite de quinzaine au moins, être visitée à l'endroit des coups de feu comme ailleurs, l'intervalle entre la tôle de la chaudière et la tourelle devrait donc être de 0m,30 environ, à moins qu'à chaque visite on ne démolisse en partie cette

dernière, ce qui ne doit pas avoir de grands inconvénients, car il nous semble que cette maçonnerie ne doit pas avoir une bien longue durée, et pourtant il faut qu'elle soit entretenue en bon état, car si elle était crevassée de manière à permettre à des dards de flamme de venir frapper la chaudière, le remède serait pire que le mal.

Quant à la diminution de rendement en vapeur de la chaudière par suite de l'addition de cette tourelle, elle ne doit pas être bien sensible, une fois en marche, mais lors de la mise en feu il y aura évidemment retard. D'ailleurs ces considérations de rendement plus ou moins grand ne peuvent entrer en ligne de compte quand il s'agit d'une mesure de sécurité.

Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.

A la suite de la discussion qui a eu lieu au sujet de cette explosion, la Commission centrale des machines à vapeur, dans sa séance du 31 juillet 1885, a émis, sur la proposition du rapporteur, un avis dont une partie est reproduite ci-après :

« Les considérations exposées par M. l'ingénieur en chef Trautmann sont très dignes d'attention, il conclut à la recommandation de diverses mesures que l'on retrouve parmi celles qui ont été indiquées par la Commission centrale en 1878 et insérées dans les *Annales des Mines*. Tous les désordres qui se sont présentés à Marnaval étaient prévus dans ce travail, et prévenus par les conseils qui le terminent. Il y a donc lieu d'insister sur ces prudentes recommandations par une circulaire qui les rappellerait aux ingénieurs, chargés à leur tour d'appeler sur ce point la sollicitude des chefs d'industrie. »

RAPPORT (*)

SUR L'EXPLOSION D'UN CUVIER A LESSIVE

DANS UNE BLANCHISSERIE, A PARIS

Par M. LUUYT, ingénieur en chef des mines.

Le 13 avril 1883, un cuvier à lessive a fait explosion dans la blanchisserie sise rue de Courcelles n° 133, à Paris, occasionnant des blessures à plusieurs ouvriers.

M. l'ingénieur des mines Perrin, a constaté que le récipient de 350 litres de capacité, dans lequel se fait l'échauffement de la lessive, au lieu d'être placé à quelque distance du cuvier, et relié avec lui par deux tuyaux d'une certaine longueur, l'un de jetée ou d'ascension, l'autre de retour, est placé sous le cuvier avec lequel il fait corps. Il n'en est séparé que par un couvercle formé d'une plaque de fonte de 15 millimètres d'épaisseur percée de deux orifices pourvus de clapets s'ouvrant du cuvier vers le récipient; c'est par ces orifices que la lessive, après être montée par le tuyau de jetée central, s'être déversée sur le linge et refroidie en le traversant, retourne dans le récipient inférieur pour s'y réchauffer et recommencer le même trajet.

Dans la plupart des appareils de ce genre, on emploie, pour produire l'échauffement et la montée de la lessive, un

(*) Ce rapport a été présenté à la Commission centrale des machines à vapeur dans sa séance du 23 octobre 1883.

injecteur dont l'action est analogue à celle du Giffard : un jet de vapeur arrivant du générateur est lancé verticalement de bas en haut dans l'axe du tuyau de jetée; ce jet aspire la lessive du récipient placé en contre-bas, et l'entraîne jusqu'à l'orifice supérieur du tuyau. Au début de l'opération, on peut ainsi faire agir sur le linge de la lessive froide, qui ne s'échauffe que progressivement par le mélange de vapeur condensée, et l'opération s'arrête d'elle-même lorsque la température atteint 90° environ, point où l'entraînement par le jet de vapeur cesse de se produire. Ce dispositif est appliqué aux huit autres cuviers de la blanchisserie. Un seul est monté sans injecteur, il est réservé au linge de cuisine, pour lequel la lessive à 90° serait insuffisante; on a donc conservé la disposition qui consiste à échauffer la lessive par barbotage de vapeur arrivant dans le récipient par un tuyau perforé jusqu'à ce qu'elle atteigne une température légèrement supérieure à 100°, et qu'il se produise une tension de vapeur suffisante pour obliger l'eau à monter par le tuyau de jetée et à se déverser par l'orifice supérieur, tension que l'on peut évaluer à $0^k,2$ par centimètre carré, d'après la hauteur de cet orifice au-dessus de la partie inférieure. Le diamètre intérieur du tuyau d'ascension est de 40 millimètres; il est protégé par la pression du linge et contre les chocs accidentels par un fourreau de 80 millimètres. Tant qu'il ne s'y produit pas d'obstruction, circonstance qui ne paraît guère probable, le récipient est en communication avec l'atmosphère par un moyen qui exclut toute pression effective nettement appréciable: aussi ce récipient, comme tous ceux qui existent en grand nombre dans les lavoirs et dans les buanderies, n'était pas considéré comme soumis aux dispositions du titre V du décret du 30 avril 1880; il n'avait été ni éprouvé, ni déclaré, ni pourvu d'une soupape de sûreté.

Le 13 avril, une quantité de 800 kilog. de linge se trou-

vait empilée comme d'habitude dans le cuvier, 800 kilog. de lessive étaient emmagasinés tant dans le récipient que dans le fond du cuvier. L'ouvrier chargé de la manœuvre ouvrit le robinet de vapeur à 6 heures, et l'opération, qui devait durer jusqu'à une heure, suivit son cours ordinaire. Cependant vers neuf heures, l'ouvrier s'aperçut que la lessive ne montait que difficilement et irrégulièrement, craignant un accident, il ferma le robinet d'admission; quelques instants après, l'explosion se produisait; le couvercle en fonte du récipient était brisé en plusieurs fragments, dont l'un, portant le tuyau de jetée, restait ou retombait dans le cuvier même, les autres étaient projetés, avec la grille et le linge qu'elle supportait, à travers la toiture jusque sur les constructions voisines; un ouvrier, qui se tenait à 6 mètres de distance, était atteint par la vapeur et brûlé sur le côté; trois autres étaient légèrement contusionnés par la chute de la toiture.

En examinant le tuyau de jetée, on y trouva une certaine quantité de fibres ligneuses agglomérées, constituant un tampon qui l'obstruait presque entièrement vers le milieu de sa longueur; ce tampon, jeté de côté par la suite, n'a pas pu être représenté à l'ingénieur. La présence de cet obstacle dans le tuyau suffisait pour élever rapidement la pression dans le récipient, puisque les générateurs fonctionnant à $5^k,5$ fournissaient de la vapeur à 4 kilog. environ au barboteur par un ajutage de 20 millimètres de diamètre intérieur. La pression totale exercée de bas en haut sur le couvercle en fonte de $1^m,035$ de diamètre (le diamètre supérieur du récipient étant de $0^m,90$), pouvait ainsi s'élever jusqu'à 25.500 kilog., ou 34.000 kilog., si l'on tient compte de la surface annulaire du recouvrement, le serrage des boulons n'étant sans doute pas bien fait; le couvercle en fonte, de 15 millimètres d'épaisseur et de forme presque plate, n'était pas en état de résister à une charge aussi forte.

Ces fibres ligneuses n'avaient pu que se détacher d'un châssis en bois sur lequel est posé le barboteur; l'expérience a démontré que sous l'action de la lessive bouillante, le bois se désagrège. Il était difficile de prévoir qu'un fragment provenant de la désagrégation progressive du châssis, aurait la forme et le volume précisément convenables pour être arrêté dans le tuyau de jetée et y produire une obstruction assez forte pour amener une explosion.

L'emploi du bois sera désormais proscrit. D'après M. Perrin, c'est la seule suite que paraisse comporter cet accident, puisque l'appareil n'était pas soumis aux prescriptions du décret du 30 avril 1880, et qu'il n'y a eu aucune contravention à relever.

L'ingénieur en chef reconnaît que l'appareil n'est pas destiné à supporter une pression notable, et que, comme tel, il n'est pas atteint par le titre V du décret du 30 avril 1880. L'événement a prouvé cependant qu'il peut se produire une pression dangereuse. Pour parer à cette éventualité, le récipient devra porter une soupape chargée pour la pression de $0^k,20$ au plus; cette soupape pourra être posée sur le tuyau d'arrivée de vapeur.

Moyennant cette précaution, il ne pourra en aucun cas se produire une pression notable, et l'appareil ne sera pas atteint par le règlement.

Votre rapporteur reproduit ces conclusions et a l'honneur de proposer l'avis suivant :

« Un récipient de vapeur, placé sous un cuvier et communiquant à l'air libre par le tuyau ascensionnel de la lessive, a été soumis accidentellement à une pression considérable et a fait explosion. Un tampon de fibres de bois s'était introduit dans le tuyau d'ascension, et avait permis à la vapeur d'atteindre une pression voisine de celle des générateurs. On évitera le retour d'un pareil accident, en posant sur le récipient ou sur le tuyau d'arrivée de vapeur une soupape de sûreté, dont la charge sera à peine supé-

rieure à celle de la colonne d'eau qui se forme dans le tuyau d'ascension, et qui ne pourra pas dépasser $0^{k},200$ par centimètre carré. De cette manière, le récipient sera en communication avec l'atmosphère par des moyens excluant une pression effective notable, soit par le tuyau d'ascension, soit, en cas d'obstruction de ce tuyau, par la soupape de sûreté. Si rare que soit cette obstruction, il faut en supposer la production et en conjurer l'effet.

« A raison du grand nombre d'appareils de ce système employés dans les blanchisseries, il y lieu d'insérer une relation de l'accident et l'avis de la Commission dans les *Annales des Mines* et dans *les Annales des Ponts et Chaussées*. »

Avis de la Commission centrale des machines à vapeur.

La Commission, après avoir entendu l'exposé, les observations et les conclusions qui précèdent et en avoir délibéré, adopte l'avis proposé par le rapporteur.

Le Président,
JACQUOT.

Le Secrétaire,
CLÉRAULT.

RECHERCHES

EXPÉRIMENTALES ET THÉORIQUES

SUR LA

COMBUSTION DES MÉLANGES GAZEUX EXPLOSIFS

Par MM. MALLARD et LE CHATELIER,
Ingénieurs au corps des mines.

La Commission du grisou, dont nous faisions partie, nous avait confié le soin de chercher à élucider, par des recherches expérimentales convenables, les conditions de production des explosions de grisou et les divers phénomènes qui les accompagnent. On pouvait espérer qu'une semblable étude ne serait pas inutile pour se rapprocher du but que poursuivait la Commission.

Les principaux résultats de nos recherches ont été déjà publiés très sommairement dans le Recueil des travaux de la Commission, dans les Comptes rendus de l'Académie des sciences (*), dans les Procès-verbaux de la Société de physique (**), dans le *Journal de physique* de M. d'Almeida (***), enfin dans le *Bulletin de la Société chimique* (****).

Nous commençons aujourd'hui, dans ce recueil, la publication intégrale de notre travail, que diverses circons-

(*) C. R. 91, 825 (1880)
(**) *Séances de la Soc. de phys.* (2 déc. 1881).
(***) *Journ. de phys.* 1882.
(****) *Bull. de la Soc. chim.*, 39, 2, 98, 268, 369 (1883).

tances indépendantes de notre volonté ont malheureusement retardée.

Nous n'avons pas limité nos recherches aux mélanges formés par l'air et le grisou; nous les avons étendues aux principaux mélanges combustibles. Nous avons cru devoir ainsi profiter des appareils souvent coûteux que nous avions dû faire établir et de l'expérience que nous avions acquise de leur maniement, pour fournir à la science quelques données nouvelles sur des questions encore peu connues.

Pour les différents mélanges gazeux étudiés nous avons cherché à déterminer :

1° Les conditions nécessaires à la production de la combustion vive, c'est-à-dire la *température d'inflammation ;*

2° La *vitesse* avec laquelle l'inflammation provoquée en un point se *propage* dans la masse gazeuze, et en général les circonstances qui caractérisent cette propagation ;

3° La *pression* qui se produit dans un vase clos après la combustion du mélange gazeux qui y est enfermé ; d'où l'on peut déduire comme nous le verrons, *la loi du refroidissement* des gaz chauds placés dans une enceinte froide, la *température* produite par la *combustion*, et enfin la nature des variations qu'une température très élevée introduit dans les *chaleurs spécifiques* des gaz.

Chacune de ces trois parties fera l'objet d'un mémoire spécial.

Les questions que nous traitons, malgré l'importance considérable qu'elles présentent soit au point de vue théorique, soit au point de vue des applications, n'ont encore été abordées que par un très petit nombre d'observateurs. Nous espérons qu'on voudra bien avoir quelque indulgence pour notre travail, fort incomplet encore malgré le temps que nous y avons consacré, en raison de la nouveauté et des difficultés du sujet.

PREMIER MÉMOIRE.

TEMPÉRATURES D'INFLAMMATION DES MÉLANGES GAZEUX.

Un mélange combustible ne peut brûler d'ordinaire que lorsqu'on en a élevé préalablement la température. Lorsque la température à laquelle est ainsi porté le mélange est suffisante et qu'elle persiste plus longtemps, la combustion, c'est-à-dire la combinaison des deux gaz mélangés, peut se faire d'une manière progressive et très lente, sans être accompagnée d'aucun phénomène extérieur apparent. Davy a depuis longtemps observé ce phénomène encore peu connu en chauffant des tubes scellés dans lesquels il avait placé des gaz combustibles mêlés à l'air.

Mais lorsque la température à laquelle on porte le mélange combustible atteint un certain chiffre déterminé, il se produit, dans toute la masse, une combustion soudaine qu'accompagnent des phénomènes de lumière et d'expansion. Ce mode de combustion, bien connu de tout le monde, a reçu le nom d'*inflammation*, et la température nécessaire pour qu'il se produise est la température d'inflammation.

Cette température varie en général avec la nature du mélange, et il est évidemment d'un grand intérêt de déterminer, pour les divers mélanges gazeux combustibles, cette importante donnée physique. Cependant les travaux connus sur ce sujet sont fort peu nombreux.

I. — Historique.

Davy (*) paraît être le premier qui se soit préoccupé de cette question. Ses recherches entreprises, comme

---

(*) *Annales de physique et de chimie*, 1816, t. I, p. 136; 1817, t. IV, p. 260 et 337.

les nôtres, pour essayer de diminuer le nombre des coups de grisou, le conduisirent à la découverte de la lampe de sûreté qui porte son nom et qui a rendu de si grands services dans l'exploitation des mines. Il trouva que le grisou ne s'enflamme pas au contact d'une barre de fer chauffée non seulement au rouge, mais même au blanc. Les flammes seules, dont la température est supérieure à celle de fusion du fer, ou le fer en combustion, produisent cet effet. Il en résulte qu'une lampe à treillis métallique pourra s'échauffer au rouge par la combustion intérieure du gaz sans provoquer par son contact l'inflammation du mélange à l'extérieur ; une expérience de plus d'un demi-siècle a confirmé l'exactitude des résultats annoncés par cet illustre savant. Mais si de ces expériences on cherchait à déduire des chiffres précis de température d'inflammation, on s'exposerait à commettre de graves erreurs, comme nous le montrerons plus loin.

Davy a étendu ensuite ses recherches à un certain nombre d'autres gaz combustibles et les a rangés ainsi qu'il suit, d'après leur ordre d'inflammabilité croissante : formène, éthylène, oxyde de carbone, hydrogène et phosphure d'hydrogène.

Pour ce dernier gaz, PhH^3, il a donné une température précise d'inflammation, le nombre de 116 degrés.

Enfin il a reconnu que les gaz combustibles mêlés à l'air et chauffés dans des tubes fermés à une température un peu inférieure à celle d'inflammation, se combinent progressivement, en éprouvant une combustion lente qui n'est accompagnée d'aucun dégagement de lumière.

Depuis la publication du mémoire classique de Davy, où sont consignés les résultats précédents, les seules recherches qui aient été faites sur ce sujet sont dues à Bunsen. Ce savant a donné une série de nombres relatifs aux mélanges d'hydrogène et d'oxyde de carbone additionnés de divers gaz inertes, tels que l'azote, l'acide carbo-

nique. Il les a malheureusement déduits de considérations théoriques très contestables ; il avait admis qu'un mélange gazeux ne cesse d'être combustible que lorsque sa température de combustion s'abaisse jusqu'à devenir égale à sa température d'inflammation. Quoiqu'il en soit, voici les nombres publiés par cet illustre savant :

Mélanges.	Températures d'inflammation.
1 vol. (H + O) avec 2,85 vol. de CO^2....	1790°
1 vol. (H + O) avec 3,65 vol. de H.....	2116°
1 vol. (H + O) avec 10 vol. de O.....	857°

Nous n'avons rien trouvé de plus sur ce point intéressant de la mécanique chimique. La pauvreté des résultats tient en partie aux difficultés que présentent les recherches.

II. — Méthodes et appareils d'expérimentation.

Pour déterminer la température d'inflammation d'un mélange gazeux, le plus simple serait de porter dans ce mélange un corps chaud, tel qu'un fer rouge par exemple, dont on éléverait graduellement la température jusqu'à ce que, le gaz en contact avec le fer rouge étant enflammé, la combustion se propageât dans toute la masse gazeuse. Si l'on ajoute la condition (nécessaire comme nous le verrons dans le second mémoire) d'une dimension convenable donnée au corps chaud, ce procédé serait théoriquement correct. On a vu que Davy l'avait employé pour les mélanges d'air et de grisou. Malheureusement la difficulté de déterminer avec quelque précision la température du corps chaud à un moment donné rend presque inapplicable ce procédé si simple.

On est ainsi amené à employer un autre mode d'obser-

vation qui consiste à porter un certain volume du mélange gazeux à des températures variées ; la plus faible de toutes celles qui produisent l'inflammation est la température cherchée.

Mais on ne pourrait pas procéder en élevant graduellement la température du gaz, à partir de la température ambiante, jusqu'à ce que l'inflammation se manifeste. La combustion lente, dont Davy a signalé l'existence, se produit en effet bien avant la combustion vive, de sorte que, si l'opération dure un certain temps, la combustion peut être déjà complète lorsque le gaz atteindra la température d'inflammation.

On est donc obligé d'échauffer brusquement le mélange gazeux, ce qui ne peut se faire qu'en l'introduisant rapidement dans un récipient porté au préalable à la température dont on se propose d'éprouver l'effet. En essayant de la sorte sur un même mélange l'effet d'un nombre suffisamment grand de températures différentes, dont les unes produiront l'inflammation et les autres ne la produiront pas, on arrivera, non pas à déterminer exactement la température d'inflammation, mais du moins à la comprendre entre deux températures d'autant plus rapprochées que le nombre des observations sera plus grand (*). On sera d'ailleurs averti que le mélange s'enflamme ou ne s'enflamme pas à une température donnée, soit par la vue de la flamme, soit, lorsque cela est possible, par l'observation de la variation de volume, qui accompagne souvent

(*) On sait qu'il est nécessaire, afin de ne pas faire d'expériences inutiles, de mettre entre la seconde et la première expérience un écart de température assez grand pour être certain d'y comprendre la température cherchée; on continue ensuite en prenant toujours la moyenne des températures trop fortes et trop faibles données par les expériences précédentes. On arrive ainsi bien plus vite qu'en faisant varier par petits écarts et toujours dans le même sens la température du tube.

la combustion, mais qui peut manquer aussi quelquefois comme cela a lieu par exemple pour le mélange de formène et d'air.

Le récipient, préalablement échauffé, dans lequel on amène le mélange, peut être plein d'un gaz qu'il faut alors déplacer rapidement; il peut aussi être vide. Nous avons employé ces deux méthodes ; dans la première, le récipient était un *tube*, dans la seconde, c'était un *pyromètre* en porcelaine.

Méthode du tube. — Dans la première méthode, l'appareil se composait (Pl. VIII, *fig.* 3,4) d'un tube en porcelaine et d'un pyromètre, destiné à la mesure des températures ; ils étaient placés à côté l'un de l'autre dans un gros tube en terre réfractaire qui était chauffé par un four à pétrole. L'emploi du pétrole comme combustible permettait de faire varier la température par une simple manœuvre du robinet. Le gaz d'éclairage eût été préférable ; mais en montant cet appareil nous pensions avoir à mesurer des températures beaucoup plus élevées que celles que nous avons rencontrées.

Le tube en porcelaine était précédé d'un tube en verre de même diamètre, dans lequel on voyait remonter la flamme lorsqu'il y avait inflammation. Pour éviter les explosions on arrêtait la flamme entre le tube et le réservoir de gaz au moyen d'un joint hydraulique formé par un entonnoir renversé plongeant dans une cuve pleine d'eau au fond de laquelle on faisait arriver le mélange gazeux bulle à bulle. Avec les mélanges combustibles formés par l'air la flamme venait s'éteindre tranquillement sous cet entonnoir; mais pour les mélanges contenant de l'oxygène dans lesquels se développait généralement l'onde explosive (*), l'entonnoir était brisé à chaque fois, et souvent

(*) Voir le deuxième mémoire *infra*, p. 335.

aussi la cuve renfermant l'eau. Il fallait alors entourer le tout de linges mouillés pour se préserver des éclats.

Pour faire une expérience nous procédions de la façon suivante.

Le tube en terre était chauffé par la flamme du pétrole dont l'écoulement était maintenu bien constant; au bout d'un certain temps, la température accusée par le pyromètre étant devenue stationnaire, le mélange gazeux était brusquement introduit en quantité suffisante pour purger complètement d'air le tube de porcelaine. Supposons qu'une flamme ait paru dans le tube en verre, cette première expérience nous apprenait que la température du tube était certainement supérieure à celle d'inflammation. Nous faisions alors une seconde expérience semblable après avoir laissé baisser la température du tube d'une certaine quantité, puis une troisième, une quatrième, etc. Nous arrivions ainsi non pas à déterminer exactement la température d'inflammation, mais à la comprendre, comme nous l'avons dit plus haut, entre des limites d'autant plus resserrées que le nombre d'expériences avait été plus considérable.

En faisant un nombre d'expériences suffisant, on devrait théoriquement arriver par cette méthode à ne laisser subsister qu'une incertitude très faible sur le résultat cherché. Malheureusement il arrive en réalité que dans un certain intervalle de température on obtient des résultats contradictoires d'une expérience à l'autre; c'est-à-dire que pour une même température accusée par le pyromètre, tantôt il y a, tantôt il n'y a pas d'inflammation. Cette méthode d'expérimentation comporte, en effet, une grave cause d'erreur. Par suite de la dissymétrie du chauffage, le tube et le pyromètre et même les différentes parties de ces deux appareils ne sont jamais à la même température. L'incertitude résultant de cette cause et peut-être aussi de quelques autres qui ont pu nous échapper

a toujours été assez forte et s'est élevée dans un cas jusqu'à 150°. Ce degré d'approximation est tout à fait insuffisant; aussi n'avons nous eu recours à cette méthode que lorsqu'il nous a été impossible de faire autrement.

Méthode du pyromètre. — Le second appareil (Pl. VIII, *fig.* 1, 2) que nous avons employé et qui nous a donné de bien meilleurs résultats que le précédent, consistait en une cornue de porcelaine ou pyromètre dans laquelle on faisait le vide après l'avoir chauffée convenablement et où, par une simple manœuvre de robinet, on laissait ensuite subitement rentrer le mélange gazeux. Cette cornue était placée dans un gros tube en terre chauffé au milieu d'un four Perrot. Un thermomètre à air était placé à côté dans le même tube; mais habituellement il ne servait que de témoin pour permettre de reconnaître le moment où l'équilibre de température était atteint.

La mesure des températures se faisait directement dans le pyromètre servant de chambre de combustion. On éliminait ainsi les inégalités de chauffage inévitables avec les températures un peu élevées. Cet appareil était mis en communication, lorsqu'on y avait fait le vide, avec une éprouvette graduée remplie d'air; la mesure du volume d'air aspiré donnait par un calcul très simple la température.

En appelant :

V le volume d'air mesuré,
U le volume intérieur de la cornue à la température t,
u l'espace nuisible de la tige et du robinet,
t la température extérieure,
T la température cherchée,
H la pression atmosphérique,
k la pression de l'air restant dans la cornue quand le vide y a été fait,
k le coefficient de dilatation cubique de la porcelaine.

On a :

$$\frac{V.H}{273+t} = U \cdot \frac{1+kT}{1+kt} \cdot \frac{H-h}{273+T} + u \cdot \frac{H-h}{273+t}.$$

Cette formule peut être simplifiée en négligeant un certain nombre de termes suffisamment petits dans les conditions où nous opérions (*).

On arrive ainsi, toute réduction faite, à :

$$\frac{273+T}{273+t} = \frac{U}{V-u} \cdot \frac{760-h}{760} \cdot [1+k(T-t)].$$

On calcule d'abord T en négligeant le terme très petit $k(T-t)$ et on fait après coup la correction.

Pour reconnaître si l'inflammation se produisait ou non, nous avons utilisé la contraction qui accompagne la combinaison de la plupart des mélanges gazeux. Après avoir fait une mesure de température en laissant rentrer de l'air, pur dans la cornue du pyromètre, nous faisions aussitôt une expérience en laissant rentrer le mélange gazeux. Le volume du mélange aspiré dans la cornue était le même ou plus grand que celui de l'air suivant qu'il y avait eu ou non combustion.

On ne peut ici, comme dans la première méthode, utiliser la vue directe de la flamme, parce que celle-ci ne peut traverser le tube capillaire du pyromètre. Ce procédé d'expérimentation ne peut donc pas s'appliquer aux mélanges gazeux, tels que les mélanges de grisou et d'air, qui ne se contractent pas après combinaison. Nous avons dû pour ceux-là nous contenter des expériences faites dans le tube.

(*) Les valeurs numériques des éléments de cette formule étaient les suivants :

$$U = 60^{cc},$$
$$u = 1^{cc},$$
$$h = 15^{mm}.$$

Pour mesurer une température d'inflammation on procède, comme avec la première méthode, en déterminant des limites supérieures et inférieures aussi rapprochées que possible. On arrive ainsi à des résultats très concordants d'une série d'expériences à une autre. Nous donnerons comme exemple les séries d'expériences faites sur le mélange d'hydrogène et d'air; les limites sont plus ou moins resserrées suivant le nombre d'expériences faites chaque fois, mais elles renferment à peu près toutes un point commun qui donne la température d'inflammation cherchée.

Série d'expérience.	Limite inférieure.	Limite supérieure.
nos 1	540	555
2	552	577
3	557	562
4	539	552
5	552	557
6	552	559

Le point commun, c'est-à-dire la température d'inflammation déduite de ces expériences est donc d'environ 555°. Ce chiffre est en dehors, il est vrai, des limites de deux séries d'expériences, mais l'écart est seulement de 2°, c'est-à-dire de l'ordre des erreurs possibles sur les mesures de température.

Les erreurs accidentelles que comporte cette méthode sont donc très faibles, mais on pouvait redouter des erreurs systématiques plus considérables résultant soit de la présence d'une petite quantité d'air laissée dans la cornue: 2 p. 100 du volume total (nous ne faisions le vide qu'avec une trompe à eau pour aller plus vite), soit des variations de pression qu'éprouve le gaz pendant le remplissage de la cornue.

En réalité, ces causes d'erreurs sont négligeables. La présence de l'air en plus ou moins grande proportion ne modifie pas la température d'inflammation; cela résulte

très nettement des expériences que nous donnons plus loin. Les variations de pression ne paraissent pas non plus avoir d'influence, car des expériences comparatives, faites dans le tube, où la pression ne change pas, ont donné pour les mélanges d'hydrogène et d'air les limites 550° — 560° qui comprennent, aussi bien qu'on peut le désirer, la température de 555° trouvée plus haut.

En général, nous n'avons pas fait un nombre aussi grand d'expériences sur chaque mélange gazeux, et les limites extrêmes que nous donnons sont assez écartées. Pour resserrer les limites, autant que nous l'avons fait avec l'hydrogène, il faudrait pouvoir consacrer à ces expériences un temps considérable. Des tâtonnements très longs sont en effet nécessaires pour arriver à régler un four à gaz à une température que l'on se donne d'avance.

Nous avons employé le même appareil pour faire quelques recherches sur les combustions lentes. Dans ce cas la température était donnée par le thermomètre à air placé à côté de la chambre de combustion. Après y avoir fait le vide on mettait celle-ci en communication avec l'éprouvette graduée contenant le mélange gazeux et on la chauffait progressivement. Le volume du gaz contenu dans l'éprouvette continuait à diminuer lentement par suite de la contraction qui accompagnait la combustion du mélange gazeux introduit dans la cornue. La mesure de cette absorption donnait la vitesse de la combustion lente.

III. — Résultats des expériences.

Les tableaux suivants donnent les résultats des diverses séries d'expériences que nous avons faites. Un tableau spécial est consacré à chacun des gaz combustibles que nous avons expérimentés. Nos mélanges gazeux ont toujours été préparés sur l'eau, de sorte qu'ils étaient à peu près saturés d'humidité. Les proportions des divers gaz sont toujours rapportées à 100 vol. de mélange total.

Expériences sur l'hydrogène.

Toutes les expériences, sauf une, ont été faites dans le pyromètre. Il n'y a jamais eu de retard appréciable à l'inflammation ; celle-ci s'est toujours produite pendant la fraction de seconde que nécessitait le remplissage de la cornue du pyromètre.

NUMÉROS.	MÉLANGE GAZEUX.				LIMITE		OBSERVATIONS.
	H.	Air.	O.	CO^2.	inférieure.	supérieure.	
1	30	70	»	»	540	555	
2	Id.	Id.	»	»	552	577	
3	Id.	Id.	»	»	557	562	
4	Id.	Id.	»	»	539	552	
5	Id.	Id.	»	»	552	557	
6	Id.	Id.	»	»	552	559	
7	Id.	Id.	»	»	550	560	Expérience faite dans le tube.
1	70	30	»	»	530	570	
1	85	»	15	»	557	570	
2	Id.	»	Id.	»	560	572	
1	70	»	30	»	552	569	
1	35	»	65	»	517	537	
2	Id.	»	Id.	»	530	532	
1	35	»	15	50	557	562	La contraction observée ne correspond qu'à la combustion des deux tiers de la masse gazeuse.
2	Id.	»	Id.	Id.	562	592	Combustion complète.
3	Id.	»	Id.	Id.	532	544	La moitié seulement de la masse gazeuse a brûlé.
1	49	»	21	30	582	587	
2	Id.	»	Id.	Id.	560	570	
3	Id.	»	Id.	Id.	590	595	

Expériences sur l'oyxde de carbone.

Ces expériences comme celles sur l'hydrogène ont été faites avec la cornue du pyromètre. La combustion, quand elle s'est produite, a toujours été immédiate.

NUMÉROS.	MÉLANGE GAZEUX.				LIMITE		OBSERVATIONS.
	CO.	Air.	O.	CO^2.	inférieure.	supérieure.	
1	30	70	»	»	650	660	
2	Id.	Id.	»	»	650	660	
3	Id.	Id.	»	»	»	657	
4	Id.	Id.	»	»	625	640	Expérience faite dans le tube.
1	15	35	»	50	715	725	
1	85	»	15	»	630	650	
1	70	»	30	»	600	650	
2	Id.	»	Id.	»	630	660	
3	Id.	»	Id.	»	645	670	
4	Id.	»	Id.	»	645	655	
1	30	»	70	»	650	680	
	35	»	15	50	695	715	

Expériences sur le formène ou grisou.

NUMÉROS.	MÉLANGE GAZEUX.			LIMITE		OBSERVATIONS.
	C^2H^4.	Air.	O.	inférieure.	supérieure.	
1	10	90	»	730°	760°	Ces quatre expériences ont été faites dans le tube; la combustion ne s'est produite, pour chacune d'elles, qu'au bout d'une dizaine de secondes. – Le formène avait été préparé à l'acétate de soude et très sommairement purifié.
2	Id.	Id.	»	770	790	
3	Id.	Id.	»	670	690	
4	Id.	Id.	»	640	680	Grisou recueilli aux mines d'Anzin sur un soufflard se dégageant dans une flaque d'eau.
1	30	»	70	670	690	Expériences dans le tube. — Formène préparé à l'acétate.— Explosion extrêmement violente se produisant après 2 secondes environ.
2	Id.	»	Id.	730	760	
3	Id.	»	Id.	600	650	Expérience faite dans le pyromètre. — La flamme remonte à travers le tube capillaire, et l'explosion va faire sauter tous les tubes en caoutchouc avec un bruit strident. — On est ainsi averti de la combustion qui n'est accompagnée d'aucun changement de volume. — Même retard dans l'inflammation que précédemment.
1	70	»	30	640	660	Expérience faite dans le pyromètre. — La combustion de ce mélange est accompagnée d'une dilatation considérable. — Le retard à l'inflammation est de 2 secondes environ.

Combustion lente. — Nous avons fait quelques expériences sur la combustion lente des mélanges précédents pour déterminer la vitesse de ce phénomène à différentes températures.

Le mélange tonnant $CO + O$, dont la température d'inflammation, d'après les expériences rapportées plus haut, est voisine de 650°, commence à se combiner avec une vitesse appréciable à la température de 400°. A 477° la proportion du mélange combiné dans 1 seconde a été de $\frac{1}{1.000}$, et à 615° de $\frac{1,5}{1.000}$. Les mélanges d'hydrogène nous ont donné des résultats analogues.

IV. — Discussion des résultats des expériences.

Combustion lente. — Les chiffres donnés plus haut semblent indiquer que, contrairement à ce que l'on aurait pu penser, il y a discontinuité entre les phénomènes de combustion lente et ceux de combustion vive, c'est-à-dire que, pour des températures croissantes, la vitesse de la combustion lente ne va pas en croissant régulièrement jusqu'à devenir très grande et presque instantanée à la température d'inflammation proprement dite. Cette vitesse reste au contraire toujours très faible au-dessous de la température d'inflammation, et devient brusquement très considérable dès que cette température est atteinte.

Ce fait s'explique très simplement dans la théorie mécanique des gaz. L'existence d'une combustion lente résulte de ce que, dans une masse gazeuse en équilibre de température, les différentes molécules possèdent à un moment donné des quantités de forces vives différentes suivant les chocs qu'elles viennent de recevoir et, par suite, ne sont pas réellement à la même température. Un certain nombre d'entre elles peuvent être momentanément portées

à une température égale ou supérieure à celle d'inflammation et devenir aptes à se combiner. Mais la quantité de chaleur dégagée par la combinaison de ces molécules ne suffit pas à provoquer une combustion générale parce que, se répartissant entre un très grand nombre de molécules avoisinantes, elle échauffe très peu chacune d'elles; de sorte qu'il n'y a pas propagation de l'inflammation. C'est un phénomène analogue à celui que l'on observe en essayant d'allumer un mélange gazeux au moyen d'une étincelle électrique. Cette étincelle, malgré sa température élevée, ne détermine l'inflammation que lorsqu'elle possède un volume suffisant.

Le même phénomène persiste tant que le nombre des molécules portées à la température d'inflammation n'est pas suffisamment considérable, c'est-à-dire tant que l'écart entre la température moyenne du gaz et celle d'inflammation n'est pas suffisamment petit. Lorsque cette condition est remplie, il y a propagation de la combinaison dans toute la masse, c'est-à-dire combustion vive et instantanée.

Température d'inflammation. — Nos expériences montrent que l'addition à un mélange tonnant de gaz étrangers, ou de l'un des deux gaz constituants ne modifie que très peu, ou même pas du tout dans certains cas, sa température d'inflammation. Ainsi l'azote n'a paru avoir aucune influence sur les mélanges combustibles que forment avec l'oxygène les trois gaz expérimentés, hydrogène, oxyde de carbone et formène. Il en a été de même pour ces trois gaz combustibles ajoutés chacun à leur mélange tonnant. L'oxygène en excès semble abaisser d'une vingtaine de degrés la température d'inflammation de l'hydrogène; il ne produit aucun effet semblable avec l'oxyde de carbone. L'acide carbonique, au contraire, a produit une élévation très nette quoique peu considérable, 50° environ,

de la température d'inflammation de l'oxyde de carbone. Avec le mélange d'hydrogène son action a été beaucoup plus faible, si même elle n'a pas été nulle. Les expériences sur ce point ont été assez discordantes et ne permettent de formuler aucune conclusion certaine.

La discussion de nos expériences nous conduit à adopter, comme valeurs les plus probables pour les températures d'inflammation, les nombres suivants :

1 vol. (H + O)	....	
Id.	+ 1 vol. Az......	555°
Id.	+ 1 vol. H.......	
Id.	+ 1 vol. O.......	530°
Id.	+ 1 vol. CO^2......	580° (?)
1 vol. (CO + O)	....	
Id.	+ 1 vol. Az......	655°
Id.	+ 1 vol. CO......	
Id.	+ 1 vol. O.......	
Id.	+ 1 vol. CO^2......	700°
1 vol. (C^2H^4 + 8O)	....	
Id.	+ 2 vol. Az......	650°
Id.	+ 2 vol. C^2H^4.....	

Ces résultats sont en désaccord complet avec ceux de Bunsen, ce que l'on pouvait prévoir, étant donnée l'inexactitude de la théorie sur laquelle reposent les calculs de ce savant.

Température d'inflammation du formène. — Pour le formène, le chiffre de 650° que nous donnons est en désaccord complet avec celui de 1000°, à 1200°, généralement admis, et qui repose sur une interprétation, inexacte comme nous allons le montrer, des expériences de Davy.

En outre ce chiffre de 650°, qui est celui que l'on déduit des expériences faites avec le pyromètre, sur des mélanges de formène et d'oxygène, ne concorde pas avec les expériences faites dans le tube, qui ont d'ailleurs donné les résultats les plus contradictoires.

Toutes ces discordances proviennent de ce que la combustion du formène présente une particularité capitale, que nous avons reconnue au cours de nos recherches, et sur laquelle nous appellerons particulièrement l'attention.

Tandis que les mélanges explosifs formés par l'hydrogène ou l'oxyde de carbone s'enflamment immédiatement dès qu'ils sont portés à la température convenable, ceux dans lesquels le formène est l'élément combustible n'entrent en combustion vive qu'au bout d'un certain temps et lorsqu'ils ont été maintenus pendant un certain nombre de secondes à une température égale ou supérieure à 650°.

Ce *retard à l'inflammation* s'est élevé à une dizaine de secondes environ pour les mélanges de formène et d'air, dans les environs de 650°. Il diminue à mesure que s'accroît la température à laquelle on porte le gaz, et il ne nous a pas semblé appréciable vers 1000°. Il diminue encore, à égalité de température, lorsqu'on remplace l'air par l'oxygène.

De là résultent sans doute les incertitudes qu'ont présentées les expériences faites avec le tube. Le mélange gazeux, ne faisant que traverser le tube, n'avait pas en effet le temps de s'enflammer lorsque la vitesse du gaz était trop grande, ou lorsque la température du tube n'était pas suffisamment élevée au-dessus de la température de combustion. La température qui produisait l'inflammation dépendait ainsi des conditions variables de l'expérience.

Nous avons donc été forcés d'abandonner les expériences faites avec le tube et de nous contenter de celles qui ont été faites dans le pyromètre. Il est vrai que celles-ci ont été faites avec des mélanges contenant exclusivement de l'oxygène comme gaz comburant, car avec l'air l'inflammation ne se manifeste par aucun signe extérieur. Mais comme il résulte des lois établies avec d'autres mélanges

que l'addition, à des mélanges combustibles, d'une quantité plus ou moins grande d'azote ne modifie que peu ou point la température d'inflammation, nous nous croyons en droit d'admettre que la température de 650° doit être considérée comme représentant, au moins à très peu près, la température d'inflammation des mélanges de formène et d'air, ou, ce qui est la même chose, de grisou et d'air.

Le retard à l'inflammation ne représente pas, comme on pourrait le croire, le temps nécessaire à l'échauffement des gaz, car ce temps ne doit pas dépasser quelques centièmes de seconde dans nos appareils, et d'ailleurs l'hydrogène et l'oxyde de carbone ne donnent dans les mêmes circonstances aucun retard appréciable.

Nous ne voyons à ce singulier phénomène qu'une explication plausible, c'est que la combinaison du formène et de l'oxygène ne se fait pas directement sous l'influence d'une élévation de température, mais ne se produit qu'à l'aide d'une série de réactions mutuelles dont la vitesse, d'abord lente, devient subitement très considérable lorsque les produits de ces réactions se sont formés en quantité suffisamment grande.

La combustion du formène serait ainsi analogue à celle de l'oxyde de carbone. D'après M. H. B. Dixon (*), ce gaz ne se combinerait pas directement à l'oxygène, sous l'influence de l'étincelle électrique, lorsque les gaz sont parfaitement secs. La combustion exigerait la présence d'une faible quantité de vapeur d'eau. L'oxyde de carbone réagirait alors sur l'eau pour se transformer en acide carbonique, l'hydrogène mis en liberté reformant de l'eau. L'additon au mélange explosif d'un gaz inerte tel que l'azote nécessiterait une plus grande quantité de vapeur d'eau pour déterminer l'explosion.

Il pourrait en être de même pour le formène, avec cette

(*) *Bull. de la Soc. chim.* 39, 209 (1883). Extrait.

différence que la quantité de vapeur d'eau existant dans le mélange gazeux à la température ordinaire serait toujours insuffisante pour que la combustion vive prît immédiatement naissance. La combustion se ferait d'abord lentement, mais comme elle accroîtrait sans cesse, à cause de la nature du gaz combustible, la quantité de vapeur d'eau, il arriverait un moment où la combustion vive prendrait naissance. Ce moment se ferait d'autant plus attendre, et le retard à l'inflammation serait d'autant plus considérable que la quantité de vapeur d'eau nécessaire pour produire la combustion vive serait plus grande. Par analogie avec ce qui a lieu pour l'oxyde de carbone, on devrait alors admettre que l'addition d'azote augmenterait le retard à l'inflammation, et nous avons vu en effet que ce retard est beaucoup plus grand pour les mélanges de formène et d'air que pour ceux de formène et d'oxygène.

Quoiqu'il en soit de cette explication, que nous ne proposons qu'avec réserve, faute d'avoir pu en vérifier expérimentalement l'exactitude, l'existence du retard à l'inflammation pour les mélanges dans lesquels le formène est le gaz combustible, est incontestable. Ce retard donne immédiatement la raison de ce fait, observé par Davy, et d'où l'on a déduit la température d'inflammation généralement admise pour le formène, qu'une barre de fer rouge, à une température bien supérieure à 650°, plongée dans un mélange de grisou et d'air, ne suffit pas à l'enflammer. La tranche gazeuse, immédiatement en contact avec la barre de fer, se met bien en équilibre de température avec elle; mais par suite de son échauffement elle diminue de densité, s'élève et va se mêler de nouveau au reste de la masse gazeuse qui la refroidit immédiatement. La fraction de seconde pendant laquelle elle a été chauffée a été insuffisante pour provoquer son inflammation.

Si cette explication est la vraie, tout artifice s'opposant à la circulation du gaz doit rendre l'inflammation possible.

C'est en effet ce que l'expérience suivante nous a montré d'une façon extrêmement nette. Nous avons pris comme morceau de fer chauffé au rouge un petit creuset de fonte, placé verticalement, l'ouverture en bas, et nous avons fait arriver en dessous par un tube de dégagement le mélange de formène et d'air. Les gaz les plus chauds vont ainsi s'accumuler à la partie supérieure de la cavité du creuset et, une fois arrivés là, ne peuvent plus en sortir. Dans ces conditions nous avons obtenu l'inflammation du mélange de formène et d'air en chauffant le creuset seulement à un rouge très modéré. On observe encore un retard de plusieurs secondes à l'inflammation comme dans les expériences précédentes. En retournant au contraire le creuset l'ouverture en haut, et faisant toujours arriver le gaz au-dessous, c'est-à-dire cette fois sur la partie convexe, l'inflammation ne s'est jamais produite.

Il découle immédiatement de ce fait une conséquence intéressante pour le mineur. L'impossibilité de provoquer des explosions de grisou avec des corps portés seulement à la température rouge, tels que treillis métalliques de lampe, charbon de bois, cigare, etc., est beaucoup moins absolue qu'on ne le croyait jusqu'ici. Si en effet la circulation du gaz autour de ces objets est en général assez rapide pour ne pas donner à l'inflammation le temps de se produire, on peut cependant concevoir une infinité de circonstances dans lesquelles le gaz pourra rester quelques instants en contact avec de semblables sources de chaleur et par suite s'enflammer. L'inflammation du grisou dépend donc de deux facteurs distincts : la *température* et le *temps*, dont chacun d'eux doit être d'autant plus considérable que l'autre est plus faible.

V. — Résumé.

En résumé nos recherches nous permettent de formuler les conclusions suivantes :

La température d'inflammation peut être fixée à

555°	pour le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène ;	
655°	—	d'oxyde de carbone et d'oxygène;
650°	—	de formène et d'oxygène.

L'addition au gaz tonnant d'un volume même considérable de gaz inertes modifie peu ou point la température d'inflammation.

Cependant avec les mélanges d'oxyde de carbone et d'oxygène, l'addition d'une quantité notable d'acide carbonique paraît élever cette température d'une manière sensible; un volume d'acide carbonique ajouté à un volume de mélange tonnant porte la température d'inflammation de 655° à 700°.

Pour les mélanges dans lesquels l'hydrogène et l'oxyde de carbone sont les éléments comburants, la combustion se produit dès que le mélange atteint la température d'inflammation.

Il en est tout autrement pour le formène, qu'il est permis d'assimiler au grisou. Les mélanges formés par ce gaz avec l'air ou l'oxygène ne brûlent qu'après avoir été portés durant un certain temps (qui peut atteindre une dizaine de secondes) à une température égale ou supérieure à celle d'inflammation. Le retard à l'inflammation est d'autant plus considérable que l'excès de la température du gaz sur celle d'inflammation est moins grand, et que la proportion de gaz inertes mélangés au gaz tonnant est plus grande.

Cette dernière particularité explique pourquoi, conformément aux expériences de Davy, une barre de fer rouge, bien qu'à une température supérieure à 650°, n'enflamme pas un mélange explosif de grisou. Dans les conditions ordinaires, en effet, le gaz, circulant librement autour du fer chaud, ne reste pas exposé assez longtemps à la température de celui-ci pour pouvoir s'enflammer. En s'opposant à cette circulation du gaz, on provoque aisément la combustion du mélange gazeux.

RECHERCHES

EXPÉRIMENTALES ET THÉORIQUES

SUR LA

COMBUSTION DES MÉLANGES GAZEUX EXPLOSIFS

Par MM. MALLARD et LE CHATELIER,
Ingénieurs au corps des mines.

DEUXIEME MÉMOIRE

SUR LA VITESSE DE PROPAGATION DE LA FLAMME DANS LES MÉLANGES GAZEUX.

Lorsqu'un mélange gazeux est suffisamment combustible, l'inflammation provoquée en un certain point par une flamme ou une étincelle électrique, peut s'étendre progressivement dans toute la masse. Nous nous proposons, dans ce mémoire d'étudier les lois qui régissent la propagation de cette inflammation, et particulièrement de déterminer la vitesse avec laquelle elle s'effectue dans les mélanges combustibles les plus importants.

I. — Historique.

C'est encore le grand nom de *Davy* que l'on retrouve à l'origine des recherches concernant la propagation de l'inflammation. Sans avoir fait aucune mesure précise, il re-

connut (*) que la flamme du mélange le plus combustible de grisou et d'air met moins d'une seconde à traverser un tube d'un pied de long. Il fit enfin l'observation capitale, et de laquelle son génie devait tirer la découverte de la lampe de sûreté, que des tubes étroits, des toiles métalliques suffisamment serrées, ne se laissent pas traverser par la flamme dans la plupart des mélanges où l'air est l'élément comburant.

Bunsen (**), au cours de ses expériences sur les températures de combustion des mélanges gazeux, chercha à déterminer la vitesse de propagation du mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène ; il trouva le chiffre considérable de 35 mètres par seconde.

La méthode qu'il a employée consiste à faire écouler le mélange gazeux par un orifice en mince paroi, à allumer le jet de gaz ainsi obtenu et à réduire ensuite progressivement sa vitesse jusqu'au moment où la flamme rentre dans le réservoir par l'orifice en remontant le courant gazeux. En admettant qu'à ce moment il y a égalité entre la vitesse de propagation de la flamme et la vitesse d'écoulement du gaz qui peut se mesurer directement, on en déduit la première.

MM. Schlœsing et de Mondésir ont fait un travail d'ensemble considérable sur le sujet qui nous occupe ; ils n'ont malheureusement jamais publié les résultats de leurs recherches ; elles ne sont connues que par les communications verbales qu'ils en ont obligeamment faites à un grand nombre de personnes (***).

La méthode qu'ils ont suivie consiste à enfermer les

(*) Sur l'air inflammable des mines de charbon, *Soc. royale de Londres*, 9 nov. 1815 ; *Ann. de chim. et de phys.*, traduction par Chaptal. Mémoires sur la flamme. *Ann. de chim. et phys.*, 1816, t. I, p. 136, 1817, t. IV, p. 260 et 357.

(**) *Pogg. Ann.* 1866, t. 131., p. 161.

(***) H. S. Claire Deville. Leçon sur la dissociation, p. 46.

mélanges gazeux étudiés dans un tube en verre fermé à une extrémité et ouvert à l'autre. On met le feu par l'extrémité ouverte et on pointe sur un compteur à secondes le passage de la flamme devant des repères fixes. Les expériences ont principalement porté sur les mélanges combustibles formés par l'oxyde de carbone, et dans lesquels la vitesse de propagation est assez faible pour que l'on puisse suivre la flamme à l'œil. Elles avaient été entreprises à l'occasion d'études sur les machines à gaz.

Ces recherches ont mis en évidence un fait d'une grande importance, l'influence de l'agitation du mélange gazeux sur la vitesse de propagation de la flamme. Des mélanges très *lents* (et par cette expression nous entendrons ceux dans lesquels la vitesse de propagation est faible) peuvent donner lieu à des propagations pour ainsi dire instantanées, c'est-à-dire à de véritables explosions, quand on provoque au moment de l'inflammation une agitation intérieure très vive, telle que celle que l'on obtient en faisant déboucher au milieu d'une masse gazeuse en repos un jet de gaz animé d'une grande vitesse.

Elles ont montré de plus qu'il est à peu près impossible d'éviter, pendant la combustion d'un mélange gazeux, le développement des mouvements intérieurs dus à la combustion elle-même, de telle sorte que l'on n'observe presque jamais la vitesse de propagation normale, mais toujours une vitesse accélérée et très irrégulière comme l'agitation même du gaz.

Les principales causes d'agitation dues à la combustion sont les suivantes :

1° La différence de *densité* des gaz chauds et froids. Un mélange gazeux allumé par la partie inférieure, brûle toujours plus vite que lorsqu'il est allumé par la partie supérieure. Les gaz chauds s'élèvent en effet à travers les gaz froids avec une vitesse qui vient s'ajouter à la vitesse normale de propagation. Mais l'accélération ainsi produite

est toujours très faible ; elle n'est sensible qu'avec les mélanges gazeux très lents et renfermés dans des tubes de grand diamètre.

2° La *dilatation* des gaz brûlés produit, lorsqu'on allume un mélange gazeux près de l'extrémité fermée du tube qui le contient, une agitation extrêmement violente ; les mélanges les plus lents donnent dans ces conditions de très fortes explosions. La vitesse normale de propagation peut se trouver alors facilement décuplée, elle peut même être centuplée.

3° Les *mouvements vibratoires* qui se développent toujours pendant la combustion d'un mélange gazeux, sont la cause la plus fréquente d'accélération de la flamme, mais l'effet ainsi produit est très variable d'un point à l'autre dans une même expérience, et en un même point dans des expériences consécutives, aussi les résultats obtenus sont-ils toujours très discordants.

L'un de nous (*) avait étudié précédemment la vitesse de propagation des mélanges de formène et de gaz d'éclairage avec l'air. Ces recherches avaient pour but d'établir la théorie des lampes de sûreté à treillis métalliques.

La méthode suivie a été celle de l'orifice en mince paroi, déjà employée par Bunsen.

Les résultats les plus saillants de cette étude ont été que les vitesses croissent proportionnellement aux quantités de gaz combustible ajoutées à un même volume d'air, jusqu'à un certain maximum, à partir duquel elles décroissent de nouveau, mais toujours proportionnellement aux quantités de gaz ajoutées, c'est-à-dire que la courbe obtenue en prenant pour ordonnées les vitesses et pour abscisses les quantités de gaz, est sensiblement formée de deux droites.

(*) Mallard, *Annales des mines*, 7° série, t. VII, p. 355.

La vitesse maxima n'est pas obtenue, comme on aurait pu le croire, avec le mélange théorique qui renferme 9,4 de formène, mais bien avec celui qui renferme 10,9 p. 100 de ce gaz. Cette vitesse a été trouvée de $0^m,55$ par seconde.

M. Fonseca (*) a cherché à déterminer la vitesse de combustion des mélanges tonnants que forment avec l'oxygène les principaux gaz combustibles. Il a utilisé dans ce but la remarque suivante : quand on souffle un mélange gazeux par l'orifice d'un chalumeau avec une vitesse suffisante, il est impossible de maintenir la flamme contre l'orifice, il se forme derrière elle un espace sombre où la combustion n'a pas encore lieu. En diminuant la vitesse d'écoulement, la flamme se rapproche de plus en plus de l'orifice jusqu'à venir le toucher. On peut admettre qu'à ce moment il y a égalité entre la vitesse de propagation de la flamme et celle des filets gazeux les plus lents qui sortent contre les bords de l'orifice. La connaissance de la vitesse de ces filets, fort difficile il est vrai à déterminer avec certitude, permet de déduire celle de propagation de la flamme.

Voici quelques-uns des nombres obtenus par cette méthode :

$H + O$	35^m par seconde.
$CO + O$	$1^m,40$ —
$C^2H^4 + 8O$	2 ,10 —
$PhH^3 + 8O$	9 ,20 —
$C^2Az + 4O$	0 ,44 —

M. Gouy (**) a essayé de déduire la vitesse de propagation de la flamme dans les mélanges de gaz d'éclairage et d'air de la mesure de l'angle du cône lumineux qui se

(*) Mémoire sur la vitesse de propagation des flammes, par Francisco da Fonseca Benevides, *Jornal de sciencias matematicas, physicas et naturaes*, num. XXVII, 1880. Lisbonne.

(**) *Ann. de phys. et chim.* 5e série, t. XVIII, p. 32.

produit à l'intérieur des flammes des brûleurs Bunsen; mais ce phénomène, comme nous aurons occasion de le montrer, est fort complexe et ne paraît pas pouvoir se prêter à des recherches de cette nature.

Enfin, pendant que nos expériences étaient en cours d'exécution, MM. Berthelot et Vieille (*), qui étudiaient parallèlement le même sujet, ont été amenés à faire une découverte importante: ils ont reconnu que dans certaines circonstances particulières l'inflammation peut se propager avec une vitesse énorme, de plusieurs milliers de mètres par seconde, c'est-à-dire bien supérieure à celle du son, dans les conditions ordinaires de température et de pression. — Ils ont donné à ce mode de propagation le nom d'*onde explosive*. — Ils ont reconnu que les lois de la propagation de cette onde étaient les mêmes que pour les ondes sonores, c'est-à-dire que sa vitesse est indépendante de la pression du mélange gazeux. Ils ont proposé pour ce phénomène l'explication théorique suivante: « Il « semble que dans l'acte de l'explosion un certain nombre « des molécules gazeuses parmi celles qui forment la « tranche enflammée, tout d'abord soient lancées en avant « avec toute la vitesse correspondant à la température « maxima développée par la combinaison chimique; leur « choc détermine la propagation de celle-ci dans la tranche « voisine et le mouvement se reproduit de tranche en « tranche avec une vitesse sinon identique du moins com- « parable à celle des molécules elles-mêmes. (**) »

II. — Méthodes d'expérimentation.

Lorsque, dans une masse gazeuze supposée indéfinie, l'inflammation est portée en un point, elle se propage

(*) *Ann. de phys. et chim.* 5e série, XXVIII, p. 289.
(**) *Comptes rendus*, t. XCIV, an. 1882, p. 151.

tout autour de ce point, et de manière qu'à chaque instant la flamme soit sur une surface sphérique dont ce point est le centre, du moins si nous éliminons toutes les causes qui peuvent rendre la propagation irrégulière.

Il serait difficile d'observer le phénomène dans les conditions générales qu'on vient de lui attribuer, et l'on est forcé, pour les observations, de se restreindre à une masse gazeuse cylindrique, dans laquelle la propagation se fait, plus ou moins exactement, suivant l'axe du cylindre.

Ceci admis, on a encore le choix entre deux procédés d'expérimentation.

Le premier consiste à donner à la masse gazeuse une translation parallèle et de sens contraire à la propagation de la flamme. La flamme se maintiendra stationnaire lorsque la vitesse de propagation sera égale à la vitesse d'écoulement du gaz.

Le second procédé consiste à laisser le gaz en repos et enfermé dans un tube à l'extrémité duquel on porte l'inflammation. On étudie directement, ou par un artifice convenable, la propagation de la flamme dans le tube.

Dans l'un et l'autre procédé, il y aura lieu de tenir compte de l'influence refroidissante des parois en contact avec la flamme.

1° Méthode de l'orifice en mince paroi.

Principe de la méthode. — Dans ce procédé on fait écouler le mélange gazeux par un orifice en mince paroi et on l'allume au delà de l'orifice. La vitesse doit être réglée au moment de l'allumage, de telle sorte que la flamme se maintienne au contact de l'orifice sans le traverser en arrière, ce qui arriverait pour une vitesse trop faible, mais sans être soufflée en avant et par suite éteinte, ce qui arriverait pour une vitesse trop forte. Ce résultat atteint on diminue progressivement la vitesse d'écoulement

du gaz jusqu'au moment où la flamme traverse l'orifice et pénètre dans la masse gazeuse renfermée derrière la paroi. On détermine la vitesse que le gaz possédait à ce moment et on peut en déduire celle de la flamme en admettant qu'il doit y avoir égalité entre ces deux vitesses au moment où la flamme traverse l'orifice.

En fait cette déduction n'est pas tout à fait légitime et cela pour plusieurs motifs : la vitesse d'écoulement du gaz n'est pas la même en tous les points de l'orifice, elle est moindre près des bords ; il existe donc tout autour de l'orifice une zone de plus facile rentrée pour la flamme.

Mais d'autre part l'action refroidissante de la paroi ralentit également la vitesse de propagation de la flamme au bord de l'orifice ; il en résulte une nouvelle source d'erreurs dont l'effet agit en sens contraire de la précédente, de telle sorte que, suivant les conditions, la vitesse moyenne d'écoulement, la seule que nous ayons mesurée, peut être plus grande ou plus faible que la vitesse de propagation cherchée.

Une nouvelle cause d'incertitude résulte de la rapide diffusion de l'air extérieur dans la flamme. La température de celle-ci est ainsi accrue et par suite la vitesse de propagation est accélérée par les mélanges gazeux renfermant un excès de gaz combustibles. L'effet contraire se produit pour les mélanges renfermant déjà un excès d'air.

Enfin cette méthode a l'inconvénient d'obliger à opérer sur des volumes de mélange explosif considérables dont la préparation est assez longue et le maniement toujours dangereux, car on n'est jamais certain qu'à un moment donné la flamme ne remontera pas jusqu'au réservoir principal pour y occasionner une violente explosion. Nous ne l'avons jamais employée pour des mélanges dont la vitesse dépasse 1 mètre par seconde, et nous n'avons pas employé d'orifices de plus de $0^m,01$ de diamètre ; nous n'oserions affirmer que dans ces conditions les vitesses de

propagation observées ne soient pas encore un peu influencées par l'action refroidissante des bords de l'orifice.

Mais nous devons ajouter immédiatement que si ce procédé présente de nombreuses causes d'erreurs systématiques dont il est impossible d'apprécier l'importance, il ne donne lieu qu'à des erreurs accidentelles très faibles, et les résultats qu'il fournit présentent une concordance remarquable, ce qui n'est pas le cas pour les autres procédés employés. Il convient donc très bien pour l'étude comparative des vitesses de propagation, et c'est peut-être encore le moins mauvais, lorsqu'il est possible de l'employer, pour déterminer leurs valeurs numériques absolues.

Description de l'appareil. — L'appareil que nous avons employé se composait essentiellement de deux parties : un réservoir de grande capacité renfermant le mélange gazeux destiné à l'expérience et un second réservoir de plus petite dimension sur la paroi duquel était percé l'orifice; ils étaient réunis par un tube métallique portant un robinet.

Le petit réservoir était formé par un tube en verre de $0^m,05$ de diamètre et d'une hauteur égale. La base supérieure était fermée par une feuille de clinquant portant au centre un orifice circulaire. Le diamètre de ces orifices a varié dans nos expériences de $0^m,001$ à $0^m,01$. Sa base inférieure était fermée par un bouchon à travers lequel débouchait le tube destiné à amener les gaz.

Ce tube, très étroit sur toute sa longueur, était prolongé à l'intérieur du cylindre de verre par un tronçon de tube de $0^m,02$ de diamètre, fermé à sa partie supérieure et percé de fentes latérales très fines. Cette disposition avait pour but de détruire la vitesse propre des divers filets gazeux avant leur arrivée à l'orifice. Le retour de la flamme en arrière était empêché par une toile métallique placée à mi-hauteur dans le cylindre de verre et, comme deuxième ligne de défense, par des grains de plomb très fins qui

emplissaient sur toute sa hauteur le tube percé de fentes.

Le grand réservoir était formé par un flacon de verre de cinq litres de capacité portant deux tubulures supérieures et une tubulure inférieure. Cette dernière, fermée par un gros robinet, servait à écouler l'eau pendant l'introduction du mélange gazeux dans le flacon. L'une des tubulures supérieures portait un tube destiné à envoyer le gaz vers l'orifice pendant l'expérience ou à l'introduire dans le flacon pendant le remplissage. La seconde tubulure servait à amener dans le flacon, pour déplacer le gaz, de l'eau qui était débitée par un vase de Mariotte, dont on pouvait facilement régler et mesurer le débit. L'emploi d'un vase de Mariotte permettait d'assurer un écoulement du gaz régulier, malgré les résistances variables qu'il rencontrait à son passage à travers l'orifice et les toiles métalliques.

Nous avons toujours déterminé la vitesse d'écoulement du gaz en divisant le volume d'eau débité en une seconde par la section de l'orifice. Pour avoir le droit de calculer ainsi, il faut que la compression du gaz dans le flacon, nécessaire pour vaincre les résistances qu'il rencontre sur son parcours, soit assez faible. Dans nos expériences elle n'a jamais dépassé quelques centimètres d'eau, c'est-à-dire quelques millièmes d'atmosphère, quantité tout à fait négligeable dans des expériences de cette nature.

Nous avons fait intervenir dans ces calculs la section réelle de l'orifice et non pas la section de la veine contractée, parce que la flamme ne remonte pas chacun des filets gazeux plus ou moins convergents qui sortent de l'orifice, mais s'avance tout d'une pièce parallèlement à l'axe de la veine gazeuse. C'est donc seulement la projection des vitesses sur cet axe qui doit intervenir et le mode de calcul que nous avons adopté donne précisément la moyenne de ces vitesses projetées.

Le même appareil nous a servi à étudier les conditions de propagation de la flamme dans des tubes de nature et

de dimension variées. Il suffisait pour cela de souder sur l'orifice un bout du tube à étudier.

2° Méthode du tube.

Le second procédé que nous avons employé et avec lequel nous avons fait la plupart de nos expériences consiste à introduire le mélange gazeux dans un tube fermé à une extrémité et ouvert à l'autre, à allumer le mélange gazeux par l'extrémité ouverte et à mesurer le temps que la flamme met à parcourir soit la totalité de la longueur du tube, soit une portion quelconque. La vitesse s'obtient par la mesure directe de ses deux éléments : chemin parcouru et temps employé. Les longueurs pouvant être déterminées avec une très grande exactitude, le degré de précision des expériences dépend donc uniquement de celui avec lequel le temps est mesuré. Les différents systèmes auxquels nous avons eu recours pour la mesure du temps sont les suivants.

Pointage au compteur à secondes. — On peut suivre la flamme à l'œil et pointer sur un compteur à secondes le passage de la flamme devant des repères fixes. Ce procédé très simple en théorie est très défectueux dans la pratique. Il ne permet pas d'obtenir dans la mesure du temps une précision supérieure au 1/10 de seconde. Pour obtenir une certaine exactitude dans les résultats on serait donc obligé de faire parcourir à la flamme des espaces considérables ; mais nous montrerons d'autre part qu'on ne peut obtenir des résultats à peu près concordants qu'en faisant les déterminations des vitesses sur des longueurs très faibles ; la propagation de la flamme est en effet sujette à des perturbations considérables qui croissent très rapidement avec la longueur du chemin déjà parcouru.

Nous ne donnerons aucun des résultats obtenus par ce procédé.

Pour obtenir des mesures exactes d'intervalles de temps aussi courts que ceux auxquels on a affaire dans ces expériences, il est indispensable d'obtenir l'enregistrement automatique du passage de la flamme devant ses repères. On peut utiliser pour cela les différentes propriétés des flammes ; nous nous sommes servis des trois suivantes : *conductibilité électrique* des gaz chauds, *dilatation* des gaz brûlés résultant de la combustion, *pouvoir photochimique* de la lumière émise par quelques flammes. Pour distinguer ces trois modes d'enregistrement, nous leur donnerons les noms d'*électrique*, *pneumatique* et *photographique*.

Enregistrement électrique.

On sait que la distance à laquelle l'étincelle d'induction jaillit dans un gaz est d'autant plus grande que sa température est plus élevée. Par conséquent, en plaçant dans un mélange gazeux combustible deux pointes reliées aux bornes d'une bobine d'induction, et séparées par une distance telle que l'étincelle ne puisse pas jaillir à la température ordinaire, le fil ne sera traversé par aucun courant. Mais aussitôt que la flamme sera arrivée entre les pointes, une étincelle jaillira à chaque interruption du courant inducteur, et en même temps un courant très faible, il est vrai, traversera le fil induit. Ce courant peut être utilisé pour donner un signal s'inscrivant sur un chronographe enregistreur quelconque. L'erreur commise sur la mesure du temps est de l'ordre de l'intervalle qui sépare deux interruptions du courant inducteur ; nous n'avons pas pu arriver à avoir utilement plus de cent interruptions par seconde, l'erreur possible était donc de 1/100 de seconde. Nous n'avons employé l'enregistrement électrique du

temps que pour les mélanges relativement lents, tels que ceux formés par le formène et le gaz d'éclairage avec l'air dont la vitesse est toujours inférieure à 2 mètres par seconde.

Description de l'appareil (Pl. IX). — L'appareil d'enregistrement se composait de trois parties distinctes : une *bobine d'induction* génératrice du courant, un *électro-aimant* récepteur du courant et donnant le signal, un *chronographe enregistreur*.

La *bobine d'induction* était du plus petit modèle Rhumkorff; elle était induite par le courant d'un élément au bichromate de potasse grand modèle; l'interrupteur était du système ordinaire; nous avions essayé d'y substituer un interrupteur de M. Deprez, pour obtenir un plus grand nombre d'étincelles par seconde, mais les courants induits devenaient trop faibles pour actionner les électro-aimants.

Les *électro-aimants récepteurs*, qui avaient été construits par M. Marcel Deprez, présentaient une sensibilité extrême. Cette sensibilité avait été obtenue en donnant aux noyaux de fer doux une masse très faible qui leur permettait d'éprouver des variations magnétiques très rapides, et en aimantant très fortement ces noyaux de fer doux par l'influence d'un puissant aimant permanent, ce qui augmentait la grandeur des variations magnétiques produites par le passage dans la bobine des courants instantanés. Un ressort en acier équilibrait très exactement l'attraction permanente exercée sur l'armature par les noyaux de fer doux, de telle sorte que la plus légère diminution de cette attraction suffisait pour amener l'arrachement complet de l'armature.

Le *chronographe enregistreur* était formé d'un cylindre métallique animé d'un mouvement de rotation parfaitement uniforme qui lui était communiqué par un moteur électrique de M. Deprez, avec régulateur électrique à force centrifuge. Ce régulateur, qui interrompt le passage du courant

aussitôt que la vitesse de rotation dépasse une certaine valeur, permet d'obtenir un mouvement uniforme avec une erreur inférieure à 1/1000. La vitesse périphérique du cylindre était de $0^m,10$ par seconde; nous nous assurions de sa régularité en inscrivant de temps en temps la vibration d'un diapason donnant 100 oscillations complètes. Les électro-aimants étaient portés par un chariot qu'une vis déplaçait devant le cylindre.

Ces appareils d'enregistrement électrique du temps sont d'un maniement très délicat et nous ont causé de nombreux déboires. Le réglage du ressort des électro-aimants et de la distance des pointes doit être fait avec un très grand soin. Quand les électro-aimants sont trop sensibles, les moindres trépidations, le frottement de la plume sur le papier du cylindre suffit pour faire déclencher l'armature et donner un signal à faux; quand ils sont trop paresseux, au contraire, il faut pour les faire fonctionner plusieurs étincelles consécutives qui occasionnent chacune une erreur de 1/100 de seconde sur la mesure du temps. De plus rien ne permet de distinguer les expériences défectueuses des bonnes. Pour régler convenablement les électro-aimants nous mesurions, avec notre appareil d'expérience, la vitesse de translation d'une flamme de gaz d'éclairage à laquelle nous communiquions un mouvement bien connu. Pour cela un tube métallique était fixé suivant un rayon d'une des roues du moteur et se recourbait au centre parallèlement à l'axe; un caoutchouc fixé à frottement doux en ce point amenait le gaz, qu'on allumait à l'autre extrémité du tube métallique. Cette roue faisait une révolution en trois secondes, les pointes étaient placées aux deux extrémités d'un diamètre; la flamme mettait donc $1^s,5$ à aller de l'une à l'autre, et pendant ce temps le cylindre développe $0^m,15$. Mais par suite des liaisons mécaniques existant entre le moteur et le cylindre, il est bien évident que, quelle que soit la vitesse du moteur, le même inter-

valle de $0^m,15$ correspondait toujours à une demi-révolution de la roue. Nous procédions au réglage en faisant marcher d'abord très lentement le moteur à la main et arrêtant la flamme sur les pointes jusqu'au moment où les électro-aimants avaient fonctionné; nous recommencions ensuite les mêmes expériences en faisant marcher le moteur à pleine vitesse. Les signaux donnés par les électro-aimants devaient exactement se superposer aux premiers. S'il n'en était pas ainsi chaque millimètre d'écart correspondait à une étincelle ayant jailli entre les pointes sans avoir déclenché l'armature. On augmentait alors progressivement la tension du ressort antagoniste jusqu'au moment où on obtenait la superposition exacte des signaux.

Une fois les électro-aimants réglés, nous procédions au réglage de la distance des pointes. Elles étaient écartées jusqu'au moment où l'étincelle ne jaillissait plus entre elles dans l'air, puis on doublait cette distance pour être certain que l'étincelle ne passe pas non plus dans les mélanges gazeux moins denses que l'air, tels que ceux qui renferment de l'hydrogène, du formène. Il est très important que cette condition soit remplie, car si l'étincelle jaillit au milieu de la masse gazeuse, non seulement l'expérience est manquée, mais il se produit encore une violente explosion qui brise les appareils. Il ne faut pas non plus tomber dans l'exagération opposée, car la quantité d'électricité qui circule décroît avec la distance des pointes, et le fonctionnement des électro-aimants est de plus en plus incertain.

Enregistrement pneumatique.

Principe. — Les gaz en brûlant augmentent de volume et peuvent exercer une compression plus ou moins énergique, suivant que la capacité où ils brûlent est plus ou moins hermétiquement close. Cette compression peut être

utilisée pour actionner des appareils enregistreurs convenables tels que les tambours de M. Marey. La disposition que nous avons adoptée consiste à fixer sur le côté du tube de petites capacités communiquant par un orifice étroit avec l'intérieur du tube, qui se remplissaient de mélange gazeux en même temps que ce dernier. La flamme en passant devant ces orifices enflammait le mélange renfermé dans ces petites chambres.

La compression intérieure qui s'y développe est évidemment d'autant plus forte que la vitesse de propagation est plus grande et que les orifices de passage sont plus étroits. Mais pour les mélanges très lents, on est obligé de faire les orifices très larges pour permettre le passage de la flamme, et l'on n'obtient alors que des compressions tout à fait insignifiantes. Nous n'avons pas réussi à obtenir de signaux avec les mélanges dont la vitesse de propagation est inférieure à 1 mètre par seconde. Nous avons essayé dans ce cas de transmettre l'inflammation à travers des orifices assez étroits au moyen de fils de fulmicoton, mais les résultats n'ont pas été très satisfaisants.

Le signal enregistrant le passage de la flamme devant les orifices est toujours en retard sur ce phénomène d'une quantité égale à la durée de la propagation de la flamme dans la capacité latérale, et de la propagation de l'onde comprimée dans le tube en caoutchouc qui relie la chambre de combustion au tambour enregistreur. L'erreur commise sur la mesure du temps n'est que la différence des retards aux deux points extrêmes, différence que nous avons rendue aussi faible que possible sinon nulle, en donnant les mêmes dimensions aux chambres de combustion et aux tubes de caoutchouc. Les chambres de combustion avaient $0^m,02$ de profondeur, et la distance qui les séparait, c'est-à-dire la longueur sur laquelle on effectuait la mesure de la vitesse, était de 1 mètre. L'erreur commise de ce chef était donc inférieure à 2 p. 100, sans

pourtant en différer sans doute beaucoup, car la combustion a toujours été beaucoup plus rapide dans la seconde capacité latérale que dans la première. Les caoutchoucs avaient $0^m,70$ de longueur, la compression employait à les traverser $0^s,005$. Nous n'avons reconnu aucune irrégularité notable, de telle sorte que l'on pouvait compter avec certitude sur une erreur inférieure à $\frac{1}{1.000}$ de seconde. L'erreur relative totale possible était donc de $\frac{1}{1.000\,t} + 0,02$, t étant le temps exprimé en secondes employées par la flamme pour s'avancer de l'orifice de la première chambre à celui de la seconde. Les vitesses *normales* de propagation, les plus fortes que nous ayons observées, sont inférieures à 20 mètres par seconde ; l'erreur relative commise sur la mesure des vitesses par ce procédé, a donc toujours été inférieure à 4 p. 100, quantité négligeable auprès des autres causes d'incertitude en présence desquelles on se trouve dans l'étude de ces phénomènes.

Enregistrement photographique.

On peut enfin utiliser les propriétés photochimiques de quelques flammes pour déterminer leur vitesse de propagation. Ce procédé est de beaucoup le plus parfait; il permet en effet d'enregistrer d'une façon continue la loi du mouvement de la flamme, et non pas seulement sa vitesse moyenne entre deux points donnés, qui n'apprend que très peu de choses dans le cas d'un mouvement aussi irrégulier que celui des flammes. On conçoit qu'en projetant au moyen d'un objectif photographique sur une plaque verticale animée d'un mouvement vertical, l'image d'un tube de verre horizontal rempli d'un mélange gazeux en combustion, on obtiendra une courbe dont chaque point aura pour abscisse le chemin parcouru par la flamme

dans le tube, et pour ordonnée le temps écoulé depuis l'origine de la combustion.

Notre appareil se composait d'un tube en verre horizontal formé de tronçons ayant chacun 1 mètre de longueur, et réunis par des anneaux de caoutchouc ; d'un objectif photographique à large ouverture, et du cylindre enregistreur à vitesse constante précédemment décrit sur lequel était enroulé une feuille de papier sensible au gélatinobromure.

On déterminait sur la courbe obtenue l'échelle des longueurs au moyen des interruptions dans l'image de la flamme que produisaient les raccords en caoutchouc; leur intervalle correspondait à une longueur de 1 mètre qui était celle de chacun des tronçons de tube.

L'échelle des temps était obtenue par les éclipses que produit, dans la lumière d'un fil de magnésium, un diapason battant le 1/100 de seconde. Ce fil de magnésium brûlait derrière une feuille de clinquant percée d'une fente mince, et une des branches du diapason portait, soudée à l'extrémité d'un fil métallique, une seconde feuille de clinquant également percée d'une fente mince. Le fil métallique était réglé par tâtonnement à la longueur convenable pour donner la plus grande amplitude possible aux oscillations de l'écran mobile. On obtenait ainsi, sur la feuille de papier sensible, à côté de la courbe, une ligne ponctuée, dont chacun des éléments correspondait à 1/200 de seconde. Par ce procédé on arrive à faire la mesure des temps à 1/1000 de seconde près, en donnant au cylindre une vitesse périphérique de 1 mètre par seconde. Nous obtenions ces grandes vitesses, au moyen d'un renvoi par courroie qui était sujet à des glissements et ne permettait pas par conséquent de déduire la vitesse du cylindre, de la vitesse constante et connue du moteur.

Nous n'avons réussi à employer ce procédé qu'avec le sulfure de carbone mêlé à l'oxygène ou au bioxyde d'azote.

Nous n'avons jamais obtenu d'impression photographique avec la flamme d'oxyde de carbone et d'oxygène, qui est cependant d'un bleu très intense. Peut être l'hydrogène sulfuré et l'hydrogène phosphoré avec l'oxygène et les composés oxygénés de l'azote donneraient-ils d'aussi bons résultats que le sulfure de carbone.

III. Résultats des expériences.

Lorsqu'un mélange gazeux renfermé dans un tube fermé à une extrémité et ouvert à l'autre est allumé par une flamme près de l'extrémité libre, la flamme s'avance d'un mouvement très irrégulier. Tous les procédés d'expérimentation permettent de le reconnaître, mais la méthode photographique montre de plus que ce mouvement peut se décomposer en une série de phases successives présentant des caractères bien tranchés. Ces phases sont au nombre de quatre, mais elles ne se produisent généralement pas toutes dans une même expérience.

La flamme s'avance toujours au début d'un *mouvement uniforme*, qui est indiqué sur les photographies par une portion de courbe parfaitement rectiligne qui va du point *a* au point *b* (*fig.* 1, 2, 3, Pl. X). La vitesse de ce mouvement est la vitesse normale de propagation de la flamme qui a fait l'objet principal de nos recherches, mais dont la détermination exacte présente de grandes difficultés.

Elles proviennent surtout de la transformation rapide de ce mouvement uniforme en un *mouvement vibratoire*, dont la vitesse est toujours irrégulière et beaucoup plus rapide. L'existence de cette seconde phase du mouvement de la flamme est mise, dans tous les cas, en évidence par les sons souvent très intenses que rendent les mélanges en combustion, elle se manifestait sur nos photographies par la forme sinusoïdale de la courbe qui va du point *b* au

point *c* (*fig.* 1, 2, 3, Pl. X). Généralement elle se continue jusqu'à la fin de la combustion.

Dans certains cas, cependant, elle se transforme en *onde explosive*, dont l'existence a été reconnue, pour la première fois, par MM. Berthelot et Vieille. Cette troisième phase se manifeste par la violence de l'explosion qui l'accompagne toujours et l'éclat inusité de la flamme. La courbe photographique se relève brusquement suivant une ordonnée rectiligne au point *c* (*fig.* 2, Pl. X), indiquant ainsi que, pendant la durée totale de la propagation de cette onde, le cylindre enregistreur n'avait pas eu le temps de se déplacer d'une quantité appréciable.

Enfin, comme quatrième et dernière phase, la flamme peut éprouver une *extinction* spontanée avant la combustion complète du mélange gazeux (*c*, *fig.* 4, Pl. XI).

Nous allons exposer les résultats que nous a donnée l'observation de chacune de ces phases de propagation de la flamme :

1° MOUVEMENT UNIFORME.

Le premier point à établir était l'existence d'une propagation uniforme se reproduisant toujours identique à elle-même dans les mêmes conditions. Des raisons théoriques très solides avaient conduit à l'admettre ; mais les expériences faites jusqu'ici, ainsi que la plupart des nôtres, conduisaient à une conclusion opposée. Les nombres obtenus, en opérant dans des conditions en apparence identiques, présentaient, en effet, des écarts énormes ; ils pouvaient varier du simple au double et même plus. Les observations photographiques ont pu démontrer, avec une entière certitude, l'existence de cette première phase. La rectitude absolue du premier élément de la courbe met hors de doute l'existence d'une propagation uniforme, et l'égale inclinaison de cette partie de la courbe dans des

expériences consécutives montre que la vitesse est toujours la même quand les conditions se reproduisent identiques à elles-mêmes.

Voici quelques nombres relevés sur nos courbes photographiques pour le mélange $CS^2 + 3AzO^2$.

Tube.				Vitesse initiale.
3m de longueur,	0m,03 de largeur			1m,25 (Pl. X, *fig.* 1-2)
2	—	0 ,02	—	1 ,24 (Pl. XI, *fig.* 2)
1	—	0 ,02	—	1 ,30 (Pl. XI, *fig.* 3)

Les écarts sont très faibles et tout à fait compatibles avec ceux qui peuvent résulter des petites différences que l'on peut admettre dans la composition des mélanges gazeux employés.

La *durée*, pendant laquelle la période de mouvement uniforme se conserve, est très variable. Elle croît avec le diamètre du tube. Dans des tubes de 3 mètres de longueur, les chemins parcouru par la flamme d'un mouvement uniforme ont été pour le mélange $CS^2 + 3AzO^2$:

Diamètre du tube.	Chemin parcouru.
0m,03	1m,00 (Pl. X, *fig.* 2-3)
0 ,02	0 ,80 (Pl. XI, *fig.* 1)
0 ,01	0 ,50 (Pl. XI, *fig.* 4)

Elle croît encore avec la longueur du tube jusqu'à un certain moment, à partir duquel l'augmentation de longueur ne produit plus aucun effet utile. La longueur utile que l'on peut ajouter est d'autant plus grande que le diamètre lui-même est plus grand. Le tableau suivant donne les chemins parcourus par la flamme d'un mouvement uniforme dans des tubes de longueur et de diamètre variable.

Diamètres.	0m,03	0m,02	0m,01
Longueurs.	Chemins parcourus.		
1m	0m,50	0m,56	»
2	0 ,80	0 ,73	0m,25
3	1 ,00	0 ,72	0 ,25

On voit immédiatement sur ces tableaux que pour le tube de $0^m,03$, l'augmentation de longueur jusqu'à 3 mètres a été *utile*; tandis que pour les tubes plus étroits de $0^m,02$ et $0^m,01$ l'augmentation de longueur au delà de 2 mètres ne produit aucun effet.

Il est très probable que pour tous les mélanges gazeux présentant des vitesses analogues à celles du mélange de sulfure de carbone et de bioxyde d'azote, c'est-à-dire différant peu de 1 mètre, les résultats seraient les mêmes. On pourrait donc faire des mesures de vitesses très exactes en employant un tube de $0^m,03$ de diamètre et 4 mètres de longueur, et n'utilisant que le premier mètre. Mais ces expériences photographiques étant les dernières en date que nous ayons faites, nous n'avons pu mettre à profit pour l'ensemble de nos recherches les indications qu'elles nous ont fournies.

Nous avions bien reconnu auparavant qu'on obtenait des résultats plus concordants, en déterminant la vitesse près de l'entrée d'un tube de grande longueur et nous avons fait la plupart de nos mesures sur un tube de 1 mètre de longueur et de $0^m,01$ de diamètre, prolongé par 20 ou 100 mètres de même diamètre.

D'après ce que nous venons de dire, ces longueurs énormes sont tout à fait inutiles; quelques mètres auraient produit le même effet. De plus, avec un diamètre de $0^m,01$ on ne pouvait obtenir un mouvement uniforme sur une longueur de 1 mètre. Nos mesures ont donc embrassé une partie de la période vibratoire, c'est là la raison des écarts que présentent nos chiffres.

On ne peut logiquement étendre les conclusions précédentes relatives à la durée du mouvement uniforme aux mélanges très rapides comme le mélange tonnant $H + O$. Mais nous avons fait des observations photographiques sur le mélange de sulfure de carbone et d'oxygène, dont la vitesse normale est très voisine de celle du mélange ton-

nant d'hydrogène. Nous avons obtenu pour la longueur parcourue d'un mouvement uniforme :

		Chemin parcouru.
dans un tube	de 1^m de longueur, 0^m,03 de diamètre	0^m,40 (Pl. XI, *fig.* 5)
	3 — 0 ,01 —	0 ,75 (Pl. XI, *fig.* 6)

Ces longueurs sont tout à fait comparables à celles obtenues avec les mélanges lents dans des tubes de même longueur et de même diamètre. On est donc en droit d'admettre qu'une longueur de 4 mètres et un diamètre de 0^m,03 suffirait, dans tous les cas, pour faire des mesures de vitesses précises, à condition de n'utiliser pour les mesures que le premier mètre.

INFLUENCE DE LA NATURE DES PAROIS.

La *nature des parois* du tube ne paraît exercer aucune influence sur la vitesse de propagation, ou cette influence, si elle existe, est certainement inférieure à celle des causes d'erreurs que comportaient nos expériences.

Nous avons comparé le verre avec les deux métaux plomb et laiton.

$CO + O$ dans un tube de 0^m,01 de diamètre

Verre	2^m,20	Moyenne de six expériences ayant présenté un écart de 0^m,50.
Plomb.	2 ,35	Moyenne de deux expériences.

Ces expériences ont été faites par la méthode d'enregistrement pneumatique. Les suivantes ont été faites par la méthode de l'orifice en mince paroi qui se prête très bien aux comparaisons de cette nature.

Mélange de C^2H^4 *et d'air à* 10,4 *p.* 100 *de* C^2H^4

Diamètre des tubes.	Vitesses. Verre.	Laiton.
0^m,0086	0^m,37	0^m,32
0 ,011	0 ,59	0 ,48

INFLUENCE DU DIAMÈTRE DES TUBES.

Le *diamètre* des tubes a une très grande influence sur la vitesse de propagation des flammes. Ce fait, reconnu par Davy, peut être mis en évidence par une expérience très élégante due à MM. Schlœsing et de Mondésir. Une série de tubes en verre de diamètre décroissant sont placés à côté l'un de l'autre et remplis d'un même mélange; on les allume tous simultanément au moyen d'étincelles d'induction et l'on voit la flamme dans les plus gros tubes prendre rapidement de l'avance sur celle des plus petits.

Nous avons fait quelques mesures comparatives et cherché à déterminer à partir de quel diamètre l'influence refroidissante, et par suite ralentissante des parois, cesse de se faire sentir :

$CS^2 + 3AzO^2$ (*méthode photographique*)

Diamètre.	Vitesse.
0^m,004	0,00
0 ,01	0,75
0 ,02	1,28
0 ,03	1,25

Pour ce mélange, dont la vitsse est peu supérieure à 1 mètre par seconde, l'influence des parois cesse à partir d'un diamètre de 0^m,02.

C^2H^4 *et air à* 10,4 *p.* 100 *de* C^2H^4 (*méthode de l'orifice*)

Diamètre.	Vitesse.
0^m,0032	0,00
0 ,0055	0,22
0 ,0080	0,39
0 ,0095	0,41
0 ,0122	0,47

Pour ce mélange, dont la vitesse est voisine de 0^m,50 par seconde, l'influence des parois est encore sensible avec un diamètre de 0^m,01.

H et air, à 30 p. 100 d'H (Enregistrement pneumatique)

Diamètre.	Vitesse.	Observations.
$0^m,01$	$3^m,50$	Moyenne de quatre expériences.
0 ,006	3 ,23	Une seule expérience.
0 ,003	3 ,50	Deux expériences identiques.
0 ,0009	1 ,72	Dans quatre expériences sur cinq la flamme s'est éteinte après avoir parcouru les deux tiers de son chemin.

Avec ces mélanges, dont la vitesse normale est de 3 mètres par seconde, il suffit d'un diamètre de $0^m,003$ pour annuler l'influence retardatrice des parois.

Nous n'avons pas fait d'expérience sur les mélanges contenant de l'oxygène. Mais nous avons eu l'occasion de constater que les tubes en cuivre étirés de $0^m,00025$ (1/4 de millimètre) de diamètre intérieur, n'étaient que rarement traversés par la flamme du mélange tonnant H + O, tandis qu'ils l'étaient régulièrement par celle du mélange $C^2H^4 + 8O$.

La conclusion à tirer de ces expériences est que le diamètre du tube nécessaire pour éviter tout ralentissement de la propagation de la flamme, est d'autant plus grand que la vitesse de propagation de la flamme est plus faible, et que le diamètre du tube capable de provoquer son extinction immédiate, et de s'opposer ainsi à son passage d'une façon complètement efficace, est d'autant plus petit que la vitesse est plus grande. Quant au rapport entre les deux diamètres de nulle transmission et de libre transmission de la flamme, ces expériences et quelques autres moins précises que nous n'avons pas rapportées, nous conduiraient à admettre qu'il ne doit pas être très éloigné du nombre 5. C'est-à-dire qu'en prenant pour mesurer la vitesse d'un mélange gazeux, un tube d'un diamètre cinq fois plus grand que celui qui produit son extinction immédiate, on est à peu près certain de se trouver dans les mêmes conditions que si l'on opérait dans un tube d'un diamètre indéfini.

L'action refroidissante des parois du tube a pour conséquence de donner à la flamme pendant sa propagation, une forme particulière, qui est celle d'un ménisque liquide soulevé dans un tube capillaire. Quand le tube devient assez large pour ne plus exercer d'action retardatrice sur la flamme, celle ci devient plane dans sa partie centrale. On peut se rendre compte de cette particularité en décomposant par la pensée le mélange gazeux en tranches annulaires concentriques. Chacun de ces anneaux doit avoir une vitesse de propagation particulière, d'autant plus faible qu'il est plus voisin de la paroi. Mais la juxtaposition de vitesses de propagation différentes est impossible, parce que le filet central à vitesse de propagation maxima, transmet l'inflammation aux anneaux latéraux à vitesse moindre, de telle sorte que l'inflammation, au lieu de se propager partout parallèlement à l'axe du tube se propage obliquement au voisinage des parois, et la flamme, dont la surface est normale à la direction de la propagation, s'infléchit en ces points.

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DU MÉLANGE GAZEUX.

La *température* du mélange gazeux exerce une grande influence sur la vitesse de propagation de la flamme, qui croît, comme on pouvait le prévoir, avec la température.

Nous avons trouvé pour le mélange d'hydrogène et d'air à 30 p. 100 d'hydrogène, brûlant dans un tube de verre de 1 mètre de long et $0^m,006$ de diamètre, les résultats suivants :

Température du mélange.	Vitesse.
—	—
15°	$3^m,28$
100	4 ,35

INFLUENCE DE LA NATURE ET DE LA PROPORTION DES GAZ MÉLANGÉS.

La *proportions des gaz* mêlés ensemble et leur *nature* sont évidemment les facteurs les plus importants de la

vitesse de propagation. Les tableaux que nous donnons ici renferment, avec les résultats bruts de nos expériences, dans une colonne intitulée *vitesse moyenne*, les chiffres déduits des précédents, que nous considérons comme représentant le plus probablement la marche du phénomène. Nous les avons obtenus en traçant graphiquement la courbe se rapprochant le mieux des points donnés par l'expérience, tout en leur restant plutôt inférieure ; l'erreur principale qui entache ces expériences, et qui résulte, comme nous l'avons dit, du mouvement vibratoire, tend toujours à donner des vitesses trop fortes.

Dans ces tableaux les proportions de gaz sont toujours rapportées à 100 de mélange total. Les mélanges gazeux se trouvent à la température ambiante, c'est-à-dire entre 10 et 20°. Ils étaient à peu près saturés d'humidité ayant été préparés sur l'eau.

Ces expériences ont été faites avec des tubes de longueur et de diamètre différents ; nous en donnons l'indication dans la colonne *Observations*. Un certain nombre d'entre elles ont été faites avec un tube très court de $0^m,347$ de longueur. Elles devraient être les meilleures d'après ce que nous avons dit sur la durée du mouvement de propagation uniforme. Mais elles sont certainement toutes beaucoup trop fortes à cause de l'inégale rapidité de la combustion dans les chambres ; l'erreur provenant de ce fait est devenue très considérable par suite de la faible longueur du tube ; le volume de chaque chambre était plus de 1/10 de celui du tube. Toutes les vitesses trouvées avec ce tube devraient être multipliées par un coefficient inconnu, mais sans doute assez voisin de 0,9.

Hydrogène et air.

Dans ces expériences, le diamètre des tubes était de $0^m,01$.

PROPORTIONS d'hydrogène.	VITESSES observées.	VITESSE moyenne.	LONGUEUR du tube.	OBSERVATIONS.
p. 100	mètres	mètres	mètres	
6		0,00		
10	0,70	0,60		
15	1,17 1,12		1,49	
20	1,85 2,08	1,95	0,347	Tube prolongé par 20 mètres de tubes de plomb.
25	2,56 2,56		1,49	
30	3,45 3,67	3,30	1,49	Id. Id.
	3,31 3,34		1,35	Fermé en bas.
	3,31 3,32			Prolongé.
	3,72 3,80		0,347	Fermé en bas.
	4,22 4,35		0,347	
35	4,08 4,20		1,49	Prolongé.
40	4,27 4,42	4,37	1,49	
	5,11 4,84		0,347	
	4,60 4,20		1,35	
50	4,02 3,84 3,62	3,45	1,35	
	3,90 4,20		0,347	Id.
55	2,85 2,85		1,49	
60	2,30 2,39	2,30	1,35	
	2,47 2,52		0,342	
70		1,10		
80		0,00		

Cette première série d'expériences, la plus complète de celles que nous ayons faites, confirme deux faits intéressants, déjà reconnus par l'un de nous dans ses anciennes expériences sur les mélanges de grisou et d'air. La vitesse maxima n'est pas obtenue avec le mélange renfermant des quantités équivalentes d'oxygène et de gaz combustible. Ce mélange théorique pour l'hydrogène renferme 29,5 p. 100 de ces gaz, tandis que c'est le mélange à 40 p. 100 qui a donné la plus grande vitesse. Enfin, de part et d'autre de ce maxima, les vitesses varient proportionnellement aux quantités d'hydrogène contenues dans le mélange. Nous avons représenté graphiquement ces résultats par une courbe (Pl. VIII, *fig.* 6).

Formène et air.

Ces expériences ont été faites avec du formène préparé à l'acétate de soude ; il exhalait une forte odeur d'acétone. Les expériences ont été faites les unes par la méthode de l'orifice en mince paroi avec un orifice de $0^m,008$ de diamètre, les autres dans un tube de $0^m,05$ de diamètre et 1 mètre de longueur, dont on n'utilisait que la première moitié pour les mesures. L'enregistrement des passages de la flamme était obtenu par la méthode électrique.

PROPORTIONS C^2H^4.	VITESSES observées.	VITESSE moyenne.	OBSERVATIONS.
p. 100	mètres	mètres	
5,6		**0,00**	
6,0		**0,03**	
7,7	0,15 0,20 0,22		Méthode du tube.
8,0	0,23	**0,23**	Méthode de l'orifice.
8,7	0,29		
9,3	0,34 0,39 0,30 0,33		Tube. Orifice.
10,0	0,39	**0,42**	Orifice.
10,5	0,46 0,47 0,55		Tube.
11,2	0,53 0,51 0,53		Orifice. Tube.
11,5	0,54 0,56 0,60		Orifice. Tube.
11,9	0,54		Orifice.
12,0		**0,61**	
13,2	0,48		Orifice.
14,0	0,36 0,33 0,34 0,36	**0,36**	Orifice. Tube.
14,9	0,25		Orifice.
16,0		**0,10**	
16,7		**0,00**	

Ces expériences, comme les précédentes, montrent qu'il y a à peu près proportionnalité entre les variations de vitesse et l'accroissement des quantités de gaz combustible, et que la vitesse maxima ne correspond pas au mélange théorique qui contient 9,4 p. 100 de formène. En admettant la proportionnalité exacte jusqu'au maximum, on trouverait qu'il a lieu pour le mélange renfermant 12,2 p. 100 de gaz, dont la vitesse serait de $0^m,62$. Nous avons représenté graphiquement ces résultats par la courbe. (Pl. VIII, *fig.* 7).

Nous avons étudié l'influence d'un excès d'azote ou d'acide carbonique sur la vitesse de propagation des mélanges de formène. Il était intéressant de s'assurer si les variations que présente l'atmosphère des mines pouvaient exercer une influence notable sur la propagation des explosions de grisou.

Les expériences ont été faites en ajoutant au mélange de formène et d'air renfermant 11,65 p. 100 du gaz combustible des quantités croissantes d'azote ou d'acide carbonique. Nous avons employé la méthode de l'orifice en mince paroi avec un tube de $0^m,008$ de diamètre.

QUANTITÉ DE GAZ INERTE ajouté à 1 volume du mélange primitif.	PROPORTION DE FORMÈNE renfermé dans le mélange définitif.	VITESSES
vol.		mètres
0,5 Az	8,	0,42
1,0 Az	5,8	0,30
1,4 Az	4,7	0,19
0,5 CO^2	8,3	0,31
1,0 CO^2	5,8	7,16

En comparant ces chiffres à ceux du tableau précédent, on voit qu'un excès d'azote se comporte comme le ferait un excès d'air; l'acide carbonique à volume égal exerce une action retardatrice un peu plus considérable.

On voit que, dans tous les cas, les quantités de ces gaz qu'il faut ajouter pour s'opposer à la propagation

de la flamme sont hors de toute proportion avec celles qui peuvent se rencontrer dans les mines.

Gaz d'éclairage et air.

Nous avons fait deux séries d'expériences sur le gaz d'éclairage, à un an d'intervalle. L'une a été faite par la méthode de l'orifice, l'autre dans un tube avec enregistrement pneumatique du passage de la flamme.

Proportion de gaz.	Vitesse observée.	
10,0	0,44	0,48
12,5	0,83	0,84
	0,68	
15,0	1,05	1,02
	1,05	1,03
17,5	1,16	1,16
	1,17	1,21
20,0	0,88	0,98

Ces nombres conduiraient comme limite de combustibilité à 6 p. 100 et 28 p. 100. La vitesse maxima correspondant au mélange à 17 p. 100 devrait être $1^m,25$. Le mélange théorique, sans excès de gaz ni d'air, doit être voisin de 15 p. 100, proportion qui nous a donné, dans nos expériences de pression, les résultats les plus élevés.

Sulfure de carbone et air.

Nous n'avons fait qu'une expérience sur le mélange en proportion équivalente dans un tube de 1 mètre de long et 6 millimètres de diamètre. Nous avons obtenu une vitesse de $1^m,40$ par seconde. Ce chiffre est sans doute trop fort, car il s'est produit des vibrations assez considérables dans cette expérience.

Nous avons essayé quelques mesures de vitesse pour les mélanges tonnants que forment les gaz combustibles avec

l'oxygène, mais nous n'accordons aucune confiance aux nombres que nous avons trouvés, sauf cependant pour l'oxyde de carbone. Avec l'hydrogène et le formène, nous avons certainement toujours eu production de l'onde explosive. Les nombres obtenus sont donc une moyenne entre la vitesse normale de propagation, qui ne doit pas pour ces mélanges dépasser une vingtaine de mètres par secondes, et celles de l'onde explosive, qui est de plusieurs milliers de mètres. Nous les donnerons cependant tels que nous les avons obtenus.

Oxyde de carbone et oxygène.

Ces expériences ont été faites sur le mélange tonnant $CO+O$ par la méthode du tube et par celle de l'enregistrement pneumatique. Ce mélange, très lent, n'a jamais donné lieu à l'onde explosive ; dans certains cas même, les mouvements vibratoires accompagnant la combustion ont été très faibles, comme on peut le reconnaître à la régularité du tracé donné par le style de la chambre de combustion inférieure. Nous avons fait trois séries d'expériences dans des tubes de $0^m,01$ de diamètre et de longueur variable.

1re série. Tube en verre de $1^m,49$ de long, prolongé par un tube en plomb de même diamètre et de 20 mètres de longueur.

Vitesse observée.	
$2^m,32$	
2 ,00	Vibrations faibles
2 ,50	

2e série. Même tube en verre, prolongé par 100 mètres de tube de plomb.

2 ,01	Vibrations faibles
2 ,17	
2 ,14	

3e série. Tube en plomb de 0m,347 de longueur, 0m,01 de diamètre, prolongé par 100 mètres de tube de même diamètre.

2m,31	Vibrations faibles
2 ,42	— —

Les expériences les meilleures, faites dans le tube de 1m,49, donnent une vitesse de 2 mètres par seconde. C'est le chiffre que nous admettrons. Avec le tube de 0m,347, la vitesse observée est plus grande, cela tient à la cause d'erreur signalée plus haut, c'est-à-dire l'inégale vitesse de propagation dans les deux chambres latérales.

Hydrogène et oxygène.

Les expériences sur le mélange tonnant ont donné des vitesses variant de 40 à 480 mètres par secondes. Nous ne croyons pas utile d'en donner le détail.

Nous avons également fait des expériences sur des mélanges en proportions variées d'hydrogène et d'oxygène. Nous nous sommes servis d'un tube de 1m,35 de longueur et 0m,01 de diamètre, tantôt fermé en bas, tantôt prolongé par un tube de 100 mètres de longueur. Dans le cas du tube fermé, l'onde explosive a dû se développer dans plusieurs expériences, comme le montrent les valeurs élevées trouvées pour les vitesses. Avec le tube prolongé, les nombres trouvés pour les vitesses ont toujours été beaucoup plus faibles et même assez concordants. Nous les considérons cependant comme trop forts, car la propagation de la flamme a toujours été accompagnée de mouvements vibratoires, souvent fort intenses, et, en outre, les résultats donnés par les mélanges renfermant un excès d'oxygène ne se raccordent pas avec ceux que donnent les mélanges d'hydrogène et d'air, comme cela doit certainement avoir lieu.

PROPORTION d'hydrogène.	VITESSE.		OBSERVATIONS.
	Tube fermé.	Tube prolongé.	
p. 100	mètres	mètres	
33	24	10	
50	140	17	
77	59	18	Deux expériences concordantes.
84	12	13	Deux expériences concordantes.
89		8	Deux expériences concordantes.

En prolongeant la courbe représentant les nombres de la colonne, on trouverait 20 mètres environ pour la vitesse du mélange tonnant, chiffre bien inférieur à tous ceux que nous avons observés, et que nous considérons pourtant encore comme trop élevé.

Formène et oxygène.

Le mélange tonnant nous a donné des vitesses comprises entre 38 et 100 mètres par seconde. Ces vitesses sont certainement très supérieures à la vitesse de propagation uniforme.

Sulfure de carbone et oxygène.

Nous avons fait deux expériences par la méthode photographique.

L'une, dans un tube de 1 mètre de long et $0^m,03$ de diamètre nous a donné une vitesse de 30 mètres; la seconde, dans un tube de 3 mètres de long et $0^m,01$ de diamètre, nous a donné 22 mètres. C'est ce dernier nombre que nous adopterons; dans la première expérience, la vitesse de rotation du cylindre n'était peut-être pas très exactement connue. Ces nombres ne sont affectés d'aucune erreur provenant du développement de l'onde explosive ou du mouvement vibratoire, puisque la mesure de la vitesse a été effectuée sur la portion rectiligne de la courbe photographique.

En dehors des mélanges dans lesquels le corps comburant est l'oxygène, nous avons expérimenté deux mélanges différents : celui de sulfure de carbone mêlé au bioxyde d'azote et celui d'hydrogène mêlé au chlore.

Sulfure de carbone et bioxyde d'azote.

Les deux gaz, mêlés dans les proportions convenables pour la combustion complète, ont donné par la méthode photographique une vitesse de 1m,25 par seconde.



$CS^2 + 3AzO^2$ vitesse 1m,25 par 1″

Hydrogène et chlore.

Mélanges.	Vitesse
H + Cl (1re expérience)	10m,00
— (2e —)	25 ,00
1 vol. (H + Cl) + 1 vol. H	3 ,00
— —	3 ,30
1 vol. (H + Cl) + 1 vol. Cl	6 ,00

Ces nombres sont assez incertains, et nous ne les citons que parce qu'ils donnent une idée de la grandeur de la vitesse de propagation. Il s'est toujours développé pendant la combustion des vibrations très énergiques.

La seule *conclusion générale* que l'on puisse tirer de toutes les expériences dont nous venons de faire connaître les résultats, c'est que lorsqu'on allume un mélange gazeux explosible avec une flamme, l'inflammation commence toujours au début par se propager d'un mouvement uniforme. La vitesse de ce mouvement uniforme, qui se prolonge pendant un temps plus ou moins long suivant les cas, est constante pour un même mélange gazeux brûlant dans les mêmes conditions ; elle est toujours modérée et certai-

nement inférieure à 30 mètres par seconde pour tous les mélanges étudiés jusqu'à présent.

2° MOUVEMENT VIBRATOIRE.

Le développement du mouvement vibratoire pendant la propagation de la flamme dans les tubes, signalé par MM. Schlœsing et de Mondésir, se reconnaît au son souvent extrêmement intense qui accompagne toujours la combustion et à l'aspect que présente la flamme dans les mélanges assez lents pour qu'on puisse les suivre à l'œil. On reconnaît qu'au moment où le tube commence à rendre un son, la flamme qui s'était d'abord montrée sous la forme d'une surface mince et très brillante, ne paraissant avoir que quelques millimètres d'épaisseur, devient tout à fait trouble et s'allonge jusqu'à avoir un décimètre et plus d'épaisseur. Mais nos photographies permettent de se faire de ce phénomène une idée beaucoup plus nette qu'on ne l'avait fait jusqu'ici. La courbe photographique d'abord rectiligne pendant la période de mouvement uniforme, prend ensuite une forme ondulée, figurant tantôt des sinussoïdes simples, tantôt la superposition de plusieurs sinussoïdes de périodes différentes, mais multiples les unes des autres. Leur période et leur amplitude varient d'un point à l'autre du tube pendant la propagation de la flamme.

Les résultats que nous donnons se rapportent tous au mélange de sulfure de carbone et de bioxyde d'azote mêlés dans les proportions voulues pour la combustion complète; les tubes avaient des longueurs de 1, 2, 3 mètres, et des diamètres de $0^m,01$, $0^m,02$ et $0^m,03$.

Voici les principales remarques que nous suggèrent l'étude des courbes pendant cette période.

Durée du mouvement vibratoire. — Ce mouvement succède immédiatement au mouvement uniforme ; il prend

donc naissance, d'après ce que nous avons dit plus haut du mouvement uniforme, en des points d'autant plus éloignés de l'orifice du tube que celui-ci est plus long et plus large. Il se prolonge ensuite sur une longueur variable suivant la nature du mélange et le diamètre des tubes. Avec le mélange $CS^2 + 3AzO^2$ dans le tube de $0^m,02$ de diamètre, le mouvement vibratoire se prolonge jusqu'à l'extrémité du tube (Pl. X, *fig.* 1). Il en est de même dans les tubes plus larges avec les mélanges renfermant un excès de sulfure de carbone ou de bioxyde d'azote. C'est de cette façon que doivent se comporter presque tous les mélanges combustibles formés par l'air.

Dans certains cas, au contraire, le mouvement vibratoire disparaît pour faire place soit à l'onde explosive, soit à l'extinction complète du mélange.

Amplitude des vibrations. — Les vibrations très faibles au début augmentent ensuite d'amplitude, mais d'une façon très irrégulière. Elles atteignent leur maximum quand la flamme se trouve arrivée des 2/3 aux 3/4 de la longueur des tubes; la longueur totale de ceux-ci n'a pas dépassé 5 mètres dans nos expériences (Pl. X, *fig.* 1, 2, 3). Puis, au delà de ce point, leur amplitude diminue pour s'annuler quand la flamme arrive au voisinage de l'extrémité fermée du tube. Dans les tubes de $0^m,03$ de diamètre, cette amplitude maxima a varié de $0^m,50$ à $1^m,10$ (Pl. X, *fig.* 1, 2, 3), c'est-à-dire qu'elle a pu atteindre dans certains cas plus du tiers de la longueur totale du tube.

Nous ferons remarquer en passant que les oscillations de la flamme étant précisément celles des tranches gazeuses en combustion, nos expériences donnent pour la première fois une idée précise de l'amplitude des mouvements vibratoires d'une masse gazeuse qui émet un son.

Période des vibrations. — La durée d'une vibration est

très variable d'un moment à l'autre, pendant la propagation de la flamme; il est très rare que plusieurs vibrations consécutives conservent exactement la même période. En répétant plusieurs fois la même expérience dans des conditions identiques à elles-mêmes, le mouvement vibratoire ne se reproduit jamais deux fois de la même façon. Ainsi dans cinq expériences faites avec le mélange $CS^2 + 3AzO^2$, la durée des plus grandes vibrations qui se soient développées aux 3/5 de la longueur du tube a été de $0^s,037$, $0^s,022$, $0^s,0096$, $0^s,0131$ et $0^s,018$. Nous donnerons comme exemple le détail des durées des vibrations pendant toute une expérience, dans laquelle le mouvement vibratoire a présenté relativement peu de variations :

Chemin parcouru.	Durée des vibrations.
de $0^m,80$ à $1^m,00$	$0^s,024$
1 ,00 1 ,40	0 ,0076
1 ,50 1 ,70	$0^s,0096$ et 0,0032
1 ,70 2 ,00	$0^s,0096$

On voit que les durées des vibrations qui se suivent ou qui se superposent sont ici dans le rapport simple de 1 à 3. La même chose arrive dans la plupart des cas; on rencontre aussi mais plus rarement les rapports simples de 1 à 2, 4 ou 6.

Vitesse moyenne de propagation pendant le mouvement vibratoire. — Cette vitesse est très variable, mais toujours supérieure à celle du mouvement uniforme. Elle croît avec l'amplitude et la rapidité des vibrations. Ses variations sont tantôt continues, tantôt discontinues; c'est-à-dire que dans ce dernier cas la progression de la flamme se compose de la succession d'une série de mouvements uniformes ayant des vitesses différentes.

Nous donnerons les vitesses relevées sur les photographies de la propagation de la flamme du mélange CS^2 +

$3AzO^2$ dans des tubes de $0^m,02$ de diamètre et de longueur variable.

1re *expérience* (Pl. XI, *fig.* 3).

Longueurs.		Vitesses.	Observations.	
$0^m,00$ à	$0^m,80$	$1^m,30$	Mouvement	uniforme.
0 ,80	1 ,00	5 ,50	—	vibratoire.

2e *expérience* (Pl. XI, *fig.* 2).

$0^m,00$ à	$0^m,80$	$1^m,24$	Mouvement	uniforme.
0 ,80	1 ,80	22 ,00	—	vibratoire.
1 ,80	2 ,00	3 ,00	—	—

3e *expérience* (Pl. XI, *fig.* 1).

$0^m,00$ à	$0^m,70$	$1^m,25$	Mouvement	uniforme.
0 ,70	1 ,50	5 ,30	—	vibratoire.
1 ,50	2 ,00	1 ,95	—	—
2 ,00	2 ,70	10 ,00	—	—
2 ,70	3 ,00	3 ,00	—	—

On voit par ces exemples dans quelles limites la vitesse de propagation peut varier pendant le mouvement vibratoire; elle a atteint jusqu'à vingt fois la valeur de la vitesse du mouvement uniforme. Dans d'autres expériences, ou pour d'autres mélanges, cet écart pourrait être plus considérable encore. On comprend donc les erreurs considérables auxquelles on est exposé dans la détermination de la vitesse de propagation pendant la période du mouvement uniforme, quand l'intervalle sur lequel on effectue les mesures comprend une proportion plus ou moins considérable du mouvement vibratoire. On ne saurait donc donner avec trop de réserve des chiffres déterminés dans d'aussi mauvaises conditions, surtout quand on opère dans des tubes étroits dans lesquels le mouvement vibratoire se développe bien plus rapidement.

L'*éclat* de la flamme varie pendant les phases successives d'une même vibration. Pendant le mouvement de recul,

l'éclat est moindre que pendant le mouvement d'avant. Les différences d'éclat croissent avec l'amplitude du mouvement vibratoire ; elles deviennent assez considérables pendant la période des grandes vibrations pour que la flamme donne pendant une moitié de la vibration une image photographique noire intense, et ne donne aucune image pendant la seconde moitié (Pl. X, *fig.* 1, 2, 3). Cela indique, à en juger d'après l'expérience que nous pouvions avoir des papiers photographiques employés, que l'intensité lumineuse pendant les deux phases de ces vibrations varie sensiblement dans le rapport de 1 à 10.

3° ONDE EXPLOSIVE.

Au cours de nos expériences, et particulièrement de celles qui avaient pour objet l'étude des mélanges d'hydrogène et d'oxygène, nous avions observé que, dans certaines circonstances, la vitesse de propagation pouvait devenir très considérable et dépasser plusieurs centaines de mètres par seconde. Nos procédés d'expérimentation ne nous permettaient pas de mesurer avec exactitude de semblables vitesses, et nous avions simplement considéré la production de ces vitesses énormes comme une conséquence extrême de l'augmentation considérable que, d'après ce que nous avions reconnu, les mouvements vibratoires ou les mouvements d'agitation irrégulière amènent dans la vitesse de propagation.

Les appareils que nous employions ne nous avaient pas permis de constater un fait important qui a été découvert par MM. Berthelot et Vieille, c'est que, lorsque ces vitesses exagérées se développent, elles atteignent une valeur limite qui reste constante pendant toute la durée ultérieure du mouvement et qui se reproduit identique pour le même mélange gazeux d'une expérience à l'autre ; cette valeur limite est ainsi *spécifique* pour ce mélange.

Il y a donc là un mode particulier de propagation de la flamme, et les savants qui l'ont découvert lui ont donné le nom d'*onde explosive.*

La vitesse de cette onde explosive est extrêmement grande, comme on en jugera par les nombres suivants tirés du mémoire de MM. Berthelot et Vieille (*).

Mélanges.	Vitesse par seconde.
$H + O$	2.810^m
$CO + O$	1.089
$C^2H^4 + O^8$	2.287
$C^2Az + O^4$	2.195

Ce n'est qu'après la publication de cette découverte importante, que nous avons eu l'idée de l'enregistrement photographique du phénomène de la propagation. Nous avons pu étudier ainsi le mode de production de l'onde explosive.

Nous avons reconnu que le développement de l'onde n'est pas progressif, mais toujours instantané. Les vitesses régulièrement croissantes qu'ont obtenues MM. Berthelot et Vieille avec le mélange tonnant $H + O$, proviennent vraisemblablement de ce que leurs mesures de vitesse portaient à la fois sur la totalité de la première période du mouvement uniforme, et sur des longueurs croissantes du parcours de l'onde explosive.

Au point de vue du développement de l'onde explosive, les mélanges de sulfure de carbone avec l'oxygène ou le bioxyde d'azote se comportent d'une façon absolument différente, et permettent de prévoir avec assez de vraisemblance ce qui doit arriver pour des mélanges gazeux quelconques. L'un, en effet, très lent, est comparable avec la plupart des mélanges gazeux formés par l'air, l'autre, très rapide, se rapproche de la plupart des mélanges tonnants formés par l'oxygène.

(*) *Bull. de la Soc. chim.*, 40, 353 (nov. 1883).

Le mélange tonnant de sulfure de carbone et de bioxyde d'azote ne donne que difficilement naissance à l'onde explosive. Ce phénomène ne s'observe jamais que dans les tubes ayant au moins $0^m,03$ de diamètre et 3 mètres de longueur; et encore même ne se produit-il pas régulièrement quand ces conditions sont remplies (Pl. X, *fig.* 2). Parfois l'onde ne prend pas naissance et le mouvement vibratoire continue avec ses variations habituelles jusqu'à la fin de la combustion; dans une expérience même, l'onde, après s'être développée sur un certain parcours, a cessé brusquement pour être remplacée de nouveau par la propagation vibratoire habituelle. Le point de départ de l'onde est toujours celui des grandes vibrations, son développement paraît intimement lié à l'amplitude de ces vibrations.

Le mélange de sulfure de carbone et d'oxygène donne au contraire toujours lieu à l'onde explosive, mais elle succède immédiatement à la période du mouvement uniforme; on aperçoit à peine quelques rudiments de vibration. Dans un tube en verre de $0^m,01$ la portion rectiligne de la courbe présente trois légères inflexions qui indiqueraient des vibrations de $0^m,01$ d'amplitude environ, c'est-à-dire très faibles et même indiscernables sur la *fig.* 6, Pl. XI. Dans le tube de $0^m,03$ la partie rectiligne présente alors dans son ensemble une légère inflexion qui peut passer pour une vibration naissante de longue période (Pl. XI, *fig.* 5). Le développement de l'onde a été précédé d'un ralentissement momentané qui correspondrait sensiblement au retour de l'onde comprimée développée à l'origine de la combustion et réfléchie sur l'extrémité fermée du tube.

Le passage de l'onde explosive est accompagné du développement de *pressions* instantanées énormes. Les tubes en verre de $0^m,01$ de diamètre intérieur, $0^m,002$ d'épaisseur et ouverts à une extrémité, ont toujours été pulvérisés sur toute leur longueur en fragments de quelques millimètres. Et pourtant des tubes semblables résistent facilement à des

pressions statiques d'une centaine d'atmosphères. Dans notre mémoire précédent sur les températures d'inflammation, nous avons déjà signalé des effets analogues de l'onde explosive. Nous faisions dégager les mélanges explosifs sous un entonnoir plongeant dans l'eau, qui était réduit en morceaux par l'explosion, bien que les gaz brûlés eussent un passage facile soit par le tube qui communiquait librement avec l'air, soit à travers l'eau qui n'opposait au dégagement du gaz d'autre résistance que son inertie. Ces effets sont tout à fait analogues à ceux que produit la détonation de certains explosifs solides ou liquides d'une composition homogène, tels que la nitroglycérine, le fulminate; ces corps peuvent exercer à l'air libre *des pressions énormes*, *des actions mécaniques énergiques* par suite de la rapidité de leur combustion.

L'*éclat* de la flamme pendant l'onde explosive est beaucoup plus considérable que pendant la propagation normale, comme le montre l'intensité des images photographiques qu'elle produit. Mais aussi l'extinction, le refroidissement des gaz brûlés, est beaucoup plus rapide; ils cessent de posséder une action photochimique sensible dans un intervalle de temps inappréciable, inférieur à 1/1000 de seconde, tandis que pendant la combustion normale, les gaz brûlés mettaient souvent plusieurs centièmes de seconde à se refroidir ainsi. Cette particularité donne, comme nous le montrerons plus loin, des indications très intéressantes au sujet du mode de propagation de l'onde explosive.

4° EXTINCTION SPONTANÉE.

L'*extinction spontanée* de la combustion se produit fréquemment dans les tubes étroits dont le diamètre est peu supérieur à celui qui s'oppose complètement à la propagation de la flamme. Pour les mélanges voisins de leur

limite de combustibilité, le même effet se produit encore avec des tubes plus larges.

Nous avons observé cette extinction pour le mélange d'hydrogène et d'air à 30 p. 100 d'hydrogène dans un tube de 0m,0009 de diamètre et 1 mètre de long. Sur six expériences, l'extiuction s'est produite cinq fois. Avec le mélange CS^2 et AzO^2, nous avons toujours obtenu l'extinction dans les tubes de 0m,01 de diamètre et 1 mètre ou plus de longueur (Pl. XI, *fig.* 4).

Les courbes photographiques obtenues avec ces derniers mélanges montrent que l'extinction suit toujours la production des vibrations de plus grande amplitude. Parfois l'extinction n'est pas complète ; à la suite d'une grande vibration, on voit l'image photographique disparaître complètement, puis reparaître peu à peu avec une intensité très faible, les vibrations et la vitesse de propagation sont également très petites, c'est pour ainsi dire une extinction suivie d'une nouvelle inflammation ; puis de nouveau les vibrations augmentent peu à peu d'amplitude jusqu'au moment où l'extinction se produit subitement et d'une façon définitive.

L'extinction de la flamme, comme le développement de l'onde explosive, est donc intimement liée à la production des vibrations de grande amplitude.

INFLUENCE DU POINT D'INFLAMMATION SUR LE PHÉNOMÈNE DE LA PROPAGATION DE LA FLAMME.

Dans tout ce qui précède, le point d'inflammation était placé à l'extrémité ouverte du tube renfermant le mélange gazeux. C'est évidemment là un cas très particulier ; nous avons commencé par son étude à cause de la simplicité plus grande que présente le phénomène quand la masse gazeuse qui brûle reste en repos. Nous avons étudié ensuite ce qui se passe lorsqu'on porte le point d'in-

flammation à l'extrémité opposée du tube, c'est-à-dire contre celle qui est fermée.

C'est encore au mélange de CS^2 et $Az\,O^2$ que nous avons eu recours pour cette étude ; nous n'avons réussi à l'enflammer qu'au moyen d'une balle de fulmicoton imprégnée de chlorate de potasse, que nous allumions par une étincelle électrique. Les photographies obtenues nous ont montré, ce qu'avait déjà observé M. Schlœsing, une accélération considérable de la flamme. La forme de la courbe est au début une parabole du second degré, c'est-à-dire que le mouvement de la flamme est uniformément accéléré. En employant un tube de $0^m,03$ de diamètre et 2 mètres de long, la vitesse, très faible au début, avait atteint après $0^s,03$ une vitesse voisine d'un millier de mètres. (La rotation de notre cylindre enregistreur n'était pas assez rapide pour nous permettre de mesurer des vitesses aussi considérables.) Puis, enfin, l'onde explosive a pris naissance, pulvérisant sur son parcours les cinquante derniers centimètres du tube.

Nous n'avons pu obtenir aucune mesure de vitesse avec les mélanges de formène et d'air, dont l'étude aurait présenté un grand intérêt au point de vue des explosions de grisou. Nous avons seulement reconnu que, dans un tube de $0^m,03$ de diamètre et 2 mètres de long, la durée de propagation de la flamme est tout à fait inappréciable à l'œil et à l'oreille ; c'est-à-dire vraisemblablement inférieure à 1/10 de seconde. La vitesse moyenne de propagation serait donc supérieure à 20 mètres par seconde. Le mouvement doit être régulièrement accéléré jusqu'au bout, puisque ce mélange n'est pas susceptible de donner lieu à l'onde explosive.

Quand, au lieu de prendre des tubes larges et courts, on prend des tubes étroits et longs, le phénomène change complètement de nature et présente des particularités très singulières. En allumant ainsi par l'extrémité fermée des

mélanges de gaz d'éclairage dans des tubes de $0^m,007$ de diamètre et 2 mètres de long, nous avons observé que la flamme parcourt pour ainsi dire instantanément un intervalle de $0^m,50$ environ, s'arrête, rétrograde lentement d'une dizaine de centimètres, s'arrête de nouveau, puis fait brusquement un second saut de $0^m,50$, s'arrête encore, rétrograde, et ainsi de suite. Nous donnerons plus loin l'explication très simple de ces mouvements oscillatoires singuliers. Il arrive fréquemment que pendant le mouvement de recul la flamme s'éteigne brusquement.

Quand, enfin, on place le point d'inflammation en un point quelconque de la masse gazeuse, on peut aisément prévoir ce qui arrivera en combinant l'influence des deux modes d'inflammation précédemment étudiés.

IV. — Considérations théoriques.

Pour qu'il y ait propagation de la combustion dans un mélange gazeux, les deux conditions suivantes doivent être remplies. Il faut en premier lieu que la combustion puisse être provoquée *immédiatement* par une simple *élévation de température* et en second lieu que la *quantité de chaleur* dégagée par la combustion soit assez considérable pour que la fraction qui en est transmise aux parties voisines du mélange non encore brûlées puisse les élever jusqu'à leur *température d'inflammation*. Il en résulte immédiatement que la vitesse de propagation de la flamme est intimement liée à celle de transmission de la chaleur à travers les gaz.

Cette transmission de la chaleur peut se faire par un certain nombre de procédés entièrement distincts.

Les gaz brûlés et incandescents émettent de la *chaleur rayonnante* qui se propage avec une vitesse extrême; mais

la quantité de chaleur ainsi rayonnée est trop petite, et le pouvoir absorbant des gaz froids trop faible pour que la température de ces derniers puisse s'élever ainsi d'une façon notable. Il ne peut donc y avoir de vitesse de propagation de la flamme correspondant à la vitesse de la chaleur rayonnante.

Les gaz brûlés éprouvent par suite de leur élévation de température une augmentation de *pression* momentanée suivie immédiatement d'une détente. Par suite de cette détente les tranches gazeuses voisines non encore brûlées sont comprimées brusquement et éprouvent une augmentation de température correspondante qui peut dans certains cas atteindre la température d'inflammation du mélange. La combustion se propage alors avec une vitesse qui est égale à celle avec laquelle se transmet cette compression, c'est-à-dire qui est de l'ordre de la vitesse du son. Ce mode de propagation est celui qui a été découvert expérimentalement par MM. Berthelot et Vieille; c'est l'*onde explosive*.

Les gaz brûlés, après s'être détendus, conservent encore une certaine quantité de chaleur, plus ou moins considérable, suivant les conditions dans lesquelles cette détente s'est effectuée. Cette chaleur se transmet de proche en proche par *conductibilité* calorifique et peut, lorsque l'onde explosive ne se développe pas, propager la combustion dans la masse gazeuse. Par suite de la faible conductibilité du gaz, la vitesse de propagation de la flamme correspondant à ce mode de transmission de la chaleur est toujours très faible. C'est celle que l'on observe le plus fréquemment et qui a fait l'objet principal de nos recherches.

L'existence de deux vitesses normales de propagation de la flamme est donc une conséquence nécessaire de l'existence de deux modes distincts de propagation de la chaleur dans les gaz. Ces vitesses correspondent, comme nous

avons eu l'occasion de le faire remarquer, à la *déflagration* et à la *détonation* des explosifs solides ou liquides.

En dehors de ces deux modes réguliers de propagation de la flamme, il peut s'en produire un troisième d'une nature très irrégulière et variable qui résulte du transport de la chaleur occasionnée par l'*agitation intérieure* de la masse gazeuse. Nous verrons qu'au point de vue des accidents de mines c'est de beaucoup le plus fréquent et le plus redoutable.

1° PROPAGATION PAR CONDUCTIBILITÉ.

Lorsqu'on provoque la combustion d'une masse considérable de gaz à la température θ, en portant l'inflammation en un point au moyen d'une étincelle électrique par exemple, la température T de la masse gazeuse après l'inflammation peut être calculée au moyen de l'expression

$$Q = C(T - \theta)$$

dans laquelle Q est la quantité de chaleur dégagée par la combustion de la masse gazeuse, et C la chaleur spécifique moyenne de cette même masse gazeuse après la combustion. On en tire.

$$T = \theta + \frac{Q}{C}.$$

D'après cette formule la température T, dépend donc d'une quantité invariable Q, d'une quantité C qui varie en général avec T, et d'une quantité θ qui dépend des conditions de l'expérience.

Il faut remarquer d'ailleurs que la formule exprime que le gaz a été échauffé uniquement par la chaleur que la combustion a rendue libre; elle suppose donc qu'on a considéré comme négligeable la quantité de chaleur communiquée par l'étincelle ou le procédé quelconque qui a déterminé la combustion.

Supposons l'inflammation se propageant dans un tube à section uniforme rempli d'un mélange combustible à la température initiale θ. A un moment donné de la propagation, la tranche A (Pl. VIII, *fig.* 5) vient d'être enflammée ; la masse gazeuse qui remplit le tube en arrière de A, c'est-à-dire en amont du sens de propagation, est à une température T, que l'on calculerait par la formule précédente. La tranche immédiatement en contact avec la tranche A et en avant, est à la température d'inflammation t, ou plutôt à une température infiniment voisine de t. Les tranches qui se succèdent en avant de celle-là sont à des températures graduellement décroissantes depuis la température t jusqu'à la température θ.

Quant à la tranche en A, elle n'est pas à la température T, car, au moment où le gaz s'est enflammé, il était déjà porté à la température t, de sorte que la température T' à laquelle la combustion porte la tranche est donnée par la formule

$$T' = \frac{Q}{C'} + t.$$

On voit que si l'on supposait $C' = C$, c'est-à-dire si l'on négligeait la variation de la chaleur spécifique entre T et T', et si l'on supposait $\theta = 0$, on aurait $T' = T + t$.

Au moment de l'inflammation de la tranche A, d'épaisseur ds, la répartition des températures dans le tube se trouve donc représenté par le diagramme (Pl. VIII, *fig.* 5), dans lequel on a figuré en amont de A un raccordement entre les températures T' et T. Ce diagramme reste le même à partir du moment où la propagation prend un régime uniforme, et il se transporte en quelque sorte dans le tube avec une vitesse uniforme.

Au bout du temps infiniment petit $d\tau$, la tranche A' d'épaisseur ds contiguë à la tranche A s'enflamme à son tour, et tout le diagramme s'est avancé de ds. Il a fallu pour cela que la partie antérieure du tube gagne une

quantité de chaleur représentée par l'aire infiniment petite $tt'\theta\theta'$, laquelle est égale au rectangle $AA'tt'$. Cette quantité de chaleur n'est autre que celle qui est nécessaire pour élever la tranche gazeuse d'épaisseur ds, de la température θ à la température t, elle est donc égale à

$$C'(t-\theta)\,ds.$$

La quantité de chaleur perdue par la partie postérieure du tube doit être égale à celle-là. Or la tranche A qui cède de la chaleur en avant est à la température T' et se trouve comprise entre une tranche à la température t et une tranche à la température T. La quantité de chaleur cédée pendant l'unité de temps sera une fonction de T et de t, et l'on pourra poser ainsi

$$C'(t-\theta)\,ds = d\tau F(T,t),$$

d'où l'on tire pour la vitesse v de propagation.

$$(1) \qquad \frac{ds}{d\tau} = v = \frac{F(T,t)}{C'(t-\theta)}.$$

Nos expériences sont insuffisantes pour déterminer la forme de la fonction F (T, t). Toutefois on peut penser qu'elle est proportionnelle à la conductibilité L du gaz non brûlé, enfin qu'elle s'annulle pour $T=t$, et seulement pour cette valeur de T. Il semble en effet que lorsque la température de combustion T l'emporte sur la température d'inflammation, la combustion développant une certaine quantité de chaleur, la chaleur nécessaire à l'inflammation d'une tranche peut être transmise intégralement. On peut donc mettre l'expression de v sous la forme

$$(2) \qquad v = \frac{L(T-t)}{C'(t-\theta)} f(T,t),$$

et il peut se faire que f (T, t) soit une constante.

Cette analyse du phénomène de la propagation de la flamme, tout incomplète qu'elle est, conduit à quelques conséquences intéressantes.

Elle montre tout d'abord que la tranche en combustion est toujours à une température supérieure à celle des gaz chauds et brûlés qui la touchent en arrière. Cette température plus élevée se manifeste en effet par un éclat plus considérable. Le phénomène est très net avec la flamme du bec Bunsen, dont le cône intérieur présente un éclat particulier (*).

M. Gouy, dans ses études photométriques sur les flammes (**), a trouvé les rapports suivants entre l'intensité lumineuse du cône et celle du reste de la flamme.

Flamme chargée de chlorure de sodium.

Flamme.	1
Noyau.	1,32

Limite d'inflammabilité. — Si l'on admet que la formule (2) représente la vitesse v, l'inflammation doit cesser de se propager lorsque $T = t$, c'est-à-dire lorsque la température d'inflammation est égale à la température de combustion. C'est cette condition qui déterminerait ainsi ce qu'on peut appeler la *limite d'inflammabilité* du mélange gazeux.

Cette limite est difficile à déterminer directement par l'expérience, car il est évident que, lorsque le mélange se trouve dans le voisinage de cette limite, les plus légères irrégularités dans les conditions de l'expérience arrêtent la propagation. Mais si l'on détermine, comme nous l'avons fait pour les mélanges d'hydrogène et d'air, et pour ceux de formène et d'air, la courbe qui représente la variation de la vitesse de propagation avec la proportion de gaz mélan-

(*) Cette conséquence de propagation de la combustion avait déjà été signalée par M. Vicaire dans son mémoire sur la dissociation (*Ann. de chim. et de phys.*).

(**) *Ann. de chim. et de phys.*, 5e série, t. XVIII. p. 101.

gés, on peut déterminer avec quelque exactitude les points où la courbe des vitesses a une ordonnée nulle et qui déterminent les mélanges où la propagation de la flamme est impossible.

Pour les mélanges d'hydrogène et d'air, nous avons trouvé que la vitesse de propagation est nulle lorsque le mélange renferme 6 p. 100 d'hydrogène, soit 9 p. 100 de mélange tonnant, et 80 p. 100 d'hydrogène, soit 12,6 p. 100 de mélange tonnant.

Nous verrons, dans une autre partie du travail, que les mélanges d'hydrogène et d'air qui développent, en brûlant à l'air libre, une température de 550 degrés égale à celle d'inflammation de ces mélanges, contiennent 10 p. 100 de mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène, c'est-à-dire que l'un contient 0,066 et l'autre 0,84 d'hydrogène. Ces nombres sont peu différents de ceux qui donnent une vitesse de propagation nulle.

Il en est tout autrement pour les mélanges de formène et d'air. Les mélanges de nulle propagation contiennent 0,056 et 0,167 de formène; or, le premier correspond à une température de combustion voisine de 1000 degrés, et par conséquent beaucoup plus élevée que la température d'inflammation qui est égale à 650 degrés, comme nous l'avons vu dans un mémoire précédent.

La raison de cette anomalie doit sans doute être cherchée dans le phénomène singulier que nous avons signalé pour les mélanges dans lesquels le formène est l'élément comburant. Ces mélanges, en effet, ne s'enflamment pas au moment même où ils sont portés à la température d'inflammation. Il y a un retard à la combustion, et ce retard est d'autant plus grand que la température à laquelle est porté le gaz est plus voisin de celle d'inflammation. Dans ces conditions on comprend que la combustion ne puisse se propager qu'à la condition que la température de combus-

tion soit très notablement supérieure à celle d'inflammation.

INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE INITIALE.

La vitesse de propagation est, d'après la formule (2), inversement proportionnelle à $t - \theta$; elle tendrait à devenir infinie quand $t = \theta$, ce qui est évident, puisqu'alors chaque point de la masse gazeuse étant à la température d'inflammation, la combustion se produit à la fois dans toute la masse. Lorsqu'on augmente θ, c'est-à-dire la température initiale du gaz, on diminue $t - \theta$, et par conséquent on augmente la vitesse de propagation. C'est, en effet, ce que nous avons constaté directement sur les mélanges d'hydrogène et d'air (voy. p. 321). Mais il est peu probable que l'on arrive à obtenir des vitesses croissant indéfiniment et d'une façon progressive en faisant décroître $(t - \theta)$; on obtiendrait bientôt le développement de l'onde explosive.

INFLUENCE DU DIAMÈTRE DES TUBES.

Jusqu'ici nous avons supposé que la paroi du tube ne cédait ni ne prenait aux gaz aucune quantité de chaleur. Cette hypothèse n'est jamais réalisée, et la quantité de chaleur soustraite par le tube froid aux gaz chauds pendant le temps que la tranche enflammée reste en contact avec lui, abaisse la température de combustion et diminue par conséquent la vitesse de propagation.

La quantié de chaleur soustraite à la tranche gazeuse est proportionnelle au périmètre $2\pi r$ du tube supposé circulaire, à l'excès $T - \theta$ de la température de la tranche sur celle du tube, et à un certain coefficient de conductibilité k. On aura donc, Q étant la chaleur de combustion, C la cha-

leur spécifique des gaz brûlés dont la masse est proportionnelle à r^2 et à la vitesse de propagation v.

$$Qr^2v = Cr^2v(T-\theta)+kr(T-\theta),$$

d'où l'on tire :

$$T=\theta+\frac{Q}{C+\frac{k}{rv}}.$$

La température T ne sera pas modifiée lorsque $\frac{k}{rv}$ sera négligeable vis-à-vis de C, ce qui exigera que r et v soient suffisamment grands.

Nous avons supposé que la température était la même dans tous les points d'une même section et qu'ainsi la surface de la flamme était plane. C'est ce qui n'aura jamais lieu, en vertu de l'influence refroidissante de la paroi. Il est évident qu'il y aura le long des parois du tube une zone annulaire très étroite dans laquelle la température ira rapidement en croissant depuis la température de la paroi jusqu'à la température d'inflammation. Le gaz contenu dans cette zone échappe à la combustion et ne brûle qu'après s'être diffusé dans les gaz chauds. A partir de cette zone commence la flamme, dont la température va elle-même en croissant jusqu'au centre du tube.

La vitesse de propagation croissant avec la température de la flamme, est plus grande au centre que sur les bords, et la surface de la flamme forme ainsi une sorte de ménisque, convexe du côté de la propagation, et dont les bords ne touchent pas la paroi. La courbure de ce ménisque sera évidemment d'autant plus grande au sommet que le diamètre du tube sera plus petit.

INFLUENCE DE L'AGITATION.

Lorsque le gaz dans lequel progresse la flamme est à l'état d'agitation, la vitesse de propagation augmente parce

que la chaleur se transmet non seulement en vertu de la conductibilité du mélange gazeux, mais encore en vertu des différences de vitesse des diverses parties de la masse. La surface de la flamme, au lieu de garder une forme constante et régulière, se déforme à chaque instant, augmente de largeur en multipliant les points d'inflammation et, par suite, en rendant plus rapide la progression de la combustion. L'accroissement qui en résulte dans la vitesse de cette progression n'est évidemment susceptible d'aucune définition précise, mais, en tous cas, il peut centupler et au delà la vitesse normale de propagation des mélanges lents. C'est ainsi que les mélanges de grisou et d'air, assez inoffensifs si on les juge par leur faible vitesse normale, peuvent donner lieu à de redoutables explosions.

On obtient facilement une semblable agitation lorsque dans un mélange gazeux contenu dans un tube fermé à une extrémité on porte l'inflammation près de cette extrémité; la dilatation des gaz brûlés met alors en mouvement la masse non brûlée, en lui communiquant des vitesses énormes.

Mouvement saccadé. — Lorsque l'inflammation est portée à l'extrémité d'un tube fermé très étroit et très long, la propagation de la flamme peut prendre une allure saccadée. Voici l'explication que nous proposons de ce phénomène.

Au début de l'inflammation, les gaz brûlés en se dilatant refoulent les gaz froids dans lesquels se développent des remous irréguliers qui accélèrent la propagation de la flamme. Mais les gaz brûlés ne tardent pas à se refroidir sous l'influence des parois du tube, et l'importance de cette contraction devient bientôt comparable à celle de la dilatation due à la combustion de nouvelles quantités de gaz.

Les gaz froids cessent d'être poussés en avant, ils tendent vers le repos et la vitesse de propagation se rapproche de

sa valeur normale. L'influence de la contraction devient alors d'autant plus prépondérante que la production des gaz brûlés devient moins rapide, et la flamme rétrograde jusqu'au moment où tous les gaz brûlés sont refroidis. A partir de cet instant la dilatation des gaz brûlés reprend son influence et la flamme se porte en avant pour revenir encore en arrière, et ainsi de suite.

La longueur du chemin parcouru dans chacune des périodes de ce mouvement saccadé diminue avec la rapidité de refroidissement, c'est-à-dire, toutes choses égales, avec le diamètre du tube et avec la vitesse normale de propagation.

Extinction spontanée. — Il arrive parfois, quand les tubes sont assez étroits, que la flamme s'éteigne brusquement pendant le mouvement saccadé. Cette extinction spontanée a même été observée avec le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène, par MM. Berthelot et Vieille, dans une expérience où ils ont cherché à obtenir la propagation de l'onde explosive à travers un tube de 1 millimètre de diamètre intérieur. Nous avons reconnu que cette extinction ne se produit que pendant le mouvement de recul de la flamme, c'est-à-dire quand il y a discordance entre le sens de propagation de la flamme et celui de translation des tranches gazeuses.

On peut expliquer cette influence du sens du mouvement de translation des tranches gazeuses en s'appuyant sur le fait bien connu, que, lorsque un gaz circule dans un tube, la vitesse varie d'un point à l'autre de la section, décroît depuis le centre où elle est maxima jusqu'au voisinage immédiat de la paroi où elle est nulle. Nous avons établi d'autre part que la flamme ne touche jamais les parois du tube, et qu'il existe contre celles-ci une zone froide (celle précisément qui reste en repos) qui n'intervient qu'ultérieurement dans le phénomène de combustion, lorsqu'elle

s'est diffusée vers la partie centrale du tube et a échappé ainsi à l'action refroidissante des parois. Dans les conditions normales de la propagation, c'est-à-dire quand le mélange gazeux est en repos, la zone contiguë aux parois du tube est formée, en avant de la flamme et *immédiatement derrière*, de mélange gazeux combustible, un peu plus loin d'un mélange de gaz combustible et de gaz brûlés, enfin, à une certaine distance en arrière, exclusivement de gaz brûlés.

Supposons maintenant le gaz animé d'un mouvement de translation de sens opposé à celui de propagation de la flamme. Celle-ci, qui n'occupe que la partie centrale du tube et ne touche pas les parois du tube, va se déplacer avec une vitesse supérieure à celle du gaz contenu dans la zone froide; elle arrivera en face des points où cette zone froide est formée exclusivement de gaz brûlés et la dépassera bientôt. A partir de ce moment la zone froide entourant le mélange gazeux combustible en avant de la flamme qui auparavant ne renfermait que du gaz combustible, renfermera des gaz brûlés qui se mêleront presque immédiatement au gaz combustible de la partie centrale et en altèreront la composition. Il pourra arriver que le mélange ainsi altéré devienne incombustible, et que la flamme s'éteigne. Ce résultat sera d'autant plus facilement atteint que le mélange gazeux sera plus rapproché de sa limite de combustibilité, et que le rapport de la zone annulaire froide à la section totale du tube est plus grand. Ce rapport augmente en raison inverse du diamètre du tube et de la vitesse normale de la propagation de la flamme.

Si nous supposons au contraire le mouvement de translation du gaz de même sens que celui de la propagation de la flamme, la zone froide en avant de la flamme ne sera pas modifiée, et par suite la composition du mélange combustible ne sera pas altérée. La modification de la zone froide aura lieu derrière la flamme, c'est-à-dire qu'il pas-

sera en arrière de celle-ci une plus grande quantité de mélange combustible non encore brûlé ; ce mélange brûlera bientôt en se diffusant au milieu des gaz chauds déjà brûlés.

Tout ce qui précède se rapporte à la propagation de la flamme dans un tube. La propagation dans une masse gazeuze indéfinie donne lieu à quelques remarques intéressantes.

INFLUENCE DU VOLUME DE LA SOURCE DE CHALEUR.

Supposons que l'inflammation soit portée au sein d'une masse explosive indéfinie par une sphère dont la température est supérieure à celle d'inflammation du mélange gazeux.

Considérons d'abord le cas où le rayon de la sphère est très petit. Avant que les molécules en contact avec la sphère arrivent à la température d'inflammation, les molécules gazeuses prennent sur une certaine épaisseur des températures qui vont graduellement en décroissant à mesure qu'on s'éloigne de la sphère chaude. Il faut donc que celle-ci soit capable de communiquer une certaine quantité de chaleur au gaz environnant avant que la combustion prenne naissance, et cela sans que sa température s'abaisse au-dessous de celle d'inflammation du gaz. La quantité de chaleur communiquée par la sphère au gaz ambiant dans un temps donné est proportionnelle au carré du rayon de cette sphère, d'autre part la quantité totale de chaleur qu'elle possède est proportionnelle au cube de ce même rayon. On voit donc que le rapport de ces deux quantités dont dépend la propagation de la combustion croît proportionnellement au rayon de la sphère. Le volume minimum nécessaire sera d'ailleurs d'autant plus petit que la température sera plus élevée.

L'observation confirme ce résultat et montre que l'étincelle électrique qui a une température très élevée, mais

un faible volume, est insuffisante à provoquer l'inflammation de mélanges peu combustibles, qui brûlent au contraire aisément lorsqu'on porte l'inflammation au moyen d'une flamme, moins chaude, mais beaucoup plus large.

Imaginons maintenant un mélange gazeux non explosif contenant un gaz combustible, mais dans des proportions telles que le mélange soit impropre à laisser propager l'inflammation. La combustion se produira néanmoins si l'on porte le mélange à la température d'inflammation. Supposons qu'au milieu d'un semblable mélange supposé indéfini on place une sphère dont la température, maintenue constante, soit très supérieure à la température d'inflammation du mélange. Dans une zone concentrique à la sphère, et dont le rayon sera d'autant plus grand que la température de cette sphère sera plus élevée, il se produira une température supérieure à celle de l'inflammation du mélange gazeux. Le mélange entrera donc en combustion dans cette zone, et comme en chaque point la chaleur développée par la combinaison augmentera la température, l'étendue de la zone, dans laquelle existe une température égale ou supérieure à celle de l'inflammation, se trouve naturellement augmentée.

La sphère se trouve ainsi entourée d'une auréole en combustion dont l'épaisseur sera d'autant plus grande que cette sphère sera plus grande et plus chaude, et que le mélange gazeux s'approchera davantage de la limite d'inflammation.

On peut réaliser un phénomène analogue en plongeant dans un mélange non explosif d'un gaz ambiant et d'un gaz combustible la flamme d'une bougie. Si le gaz est tout à fait inerte, on sait que le mouvement du gaz ambiant, et son afflux latéral sous l'appel de la chaleur dégagée par la flamme, produisent verticalement au-dessus de celle-ci une élévation de température qui est beaucoup moindre lorsqu'on s'écarte de la flamme, soit latéralement, soit au-

dessous. Si le gaz peut brûler sous l'influence d'une élévation de température convenable, il viendra donc former au-dessus de la flamme un panache dont l'élévation sera d'autant plus grande que la flamme est de dimension plus considérable et que le mélange s'approche davantage d'être combustible. C'est la production de ce panache au-dessus de la flamme des lampes qui avertit les mineurs de la présence du grisou longtemps avant que ce gaz soit en proportion suffisante pour former un mélange explosif.

2° PÉRIODE DU MOUVEMENT VIBRATOIRE.

Le mouvement vibratoire qui succède régulièrement au mouvement uniforme est essentiellement différent du mouvement saccadé que nous avons étudié plus haut. Les vibrations, sans être toujours plus régulières, sont beaucoup plus rapides que les oscillations du mouvement saccadé ; elles sont au nombre de plusieurs centaines par seconde. C'est donc le mouvement vibratoire ordinaire des gaz dans un tube, auquel la flamme participe.

L'explication du développement de ce mouvement vibratoire nécessite l'intervention de deux phénomènes distincts dont l'un est la cause de la production des premières vibrations, et l'autre celle de leur renforcement ultérieur.

On sait que toutes les fois qu'un gaz s'écoule dans l'atmosphère par l'extrémité ouverte d'un tube, la colonne gazeuse renfermée dans le tube entre tout entière en vibration. Cette condition se trouve remplie pendant la propagation de la flamme, puisque la dilatation des gaz brûlés les force à s'écouler par l'extrémité ouverte du tube. C'est là l'explication de la production des premières vibrations, mais cette cause est insuffisante pour rendre compte de l'intensité énorme que prend bientôt ce mouvement vibratoire.

Nos photographies montrent que pendant les différentes phases d'une même vibration l'activité de la combustion est très variable ; on peut trouver là une explication suffisante du renforcement des vibrations, pourvu qu'il y ait concordance entre l'augmentation de pression résultant de l'activité plus grande de la combustion, et celle résultant du mouvement vibratoire. C'est en effet ce que montre l'expérience ; la flamme donne l'image la plus intense pendant le mouvement de translation de la masse gazeuse vers l'extrémité fermée du tube qui correspond évidemment à une augmentation de la pression de toute la masse gazeuse.

Quant aux variations de l'activité de la combustion auxquelles nous avons ainsi recours, l'explication en est la même que celle que nous avons donnée pour l'extinction de la flamme dans le mouvement saccadé (voir p. 350). La diffusion d'une partie des gaz brûlés dans le mélange non encore brûlé, diminue sa combustibilité pendant le mouvement de recul. Cet effet se trouve d'autant plus marqué que le mouvement de la flamme a une plus grande amplitude, c'est-à-dire qu'elle se trouve plus près d'un ventre de vibration.

L'*extinction spontanée* peut être obtenue dans ce mouvement vibratoire comme dans le mouvement saccadé, et par les mêmes causes. Cette extinction se produit toujours dans la vibration arrière et dans les points du tube où les vibrations ont leur amplitude maxima, c'est-à-dire aux ventres.

Ce mode d'extinction de la flamme donne l'explication des résultats singuliers obtenus par M. Schutzemberger (*), dans son étude sur la combustion des mélanges limités dans les eudiomètres étroits. Il a trouvé que la quantité de gaz qui échappe à la combustion est toujours une fraction simple du volume total. C'est qu'en effet l'extinction

(*) *Ann. de phys. et chim.*

se produit toujours à un ventre, dont la distance à l'une des extrémités est une fraction simple de la longueur totale du tube.

3° PROPAGATION PAR COMPRESSION OU ONDE EXPLOSIVE.

Le gaz augmentant de volume par la combustion exerce sur le gaz contigu non encore brûlé une certaine compression, et il est possible de concevoir que cette compression puisse être assez élevée pour porter la tranche voisine à la température d'inflammation. On comprend donc la possibilité de la propagation de l'inflammation par la propagation de la compression. Il reste à voir dans quelles conditions le phénomène peut se produire.

Considérons par exemple le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène. D'après nos expériences, il s'enflamme à 555° et la pression exercée après la combustion en vase clos est de 10 atmosphères. Une tranche infiniment mince enflammée par échauffement atteint au plus cette pression et ne peut pas en exercer une plus élevée sur la tranche contiguë non enflammée.

Une compression de 10 atmosphères dégage une quantité de chaleur que la thermodynamique permet de calculer très simplement, et qui est insuffisante pour produire une élévation de température égale à celle d'inflammation. Il faudrait pour obtenir cette température une compression d'environ 30 atmosphères. L'onde explosive ne paraît donc pas pouvoir prendre naissance dans ces conditions : la quantité de chaleur transformée en travail mécanique pendant la détente et transportée sous cette forme à travers la masse gazeuse est une fraction trop faible de la chaleur totale de combustion.

Supposons maintenant que l'inflammation de la première tranche ne soit pas produite par échauffement, mais soit

due à une compression convenable, c'est-à-dire d'au moins 30 atmosphères, que l'on peut facilement obtenir par la détonation d'un peu de fulminate de mercure. Après la combustion, la pression de la tranche enflammée décuplera, ou au moins s'élèvera beaucoup au-dessus de sa pression initiale, qui était de 30 atmosphères, et pourra, par suite, exercer sur la tranche suivante une compression suffisante pour en provoquer l'inflammation. Celle-ci continuera donc à se propager de proche en proche par le même mécanisme.

Le mode d'inflammation influe ainsi sur la proportion de chaleur qui peut être transformée en travail mécanique par la détente des gaz brûlés. C'est là un résultat bien connu de la théorie des machines à gaz, dont on augmente considérablement le rendement en comprimant le mélange explosif avant de l'allumer. Cette transformation considérable de chaleur en travail est mise en évidence d'une façon très nette par nos photographies; pendant la propagation de l'onde explosive, l'éclat du mélange cesse en même temps que la détente dont la durée ne dépasse guère un millième de seconde. Dans la propagation normale, au contraire, chaque tranche gazeuse reste lumineuse 1/100[e] de seconde et plus; c'est-à-dire que le refroidissement dû à la détente ne suffit pas pour faire disparaître complètement l'éclat lumineux des gaz.

Cette théorie suppose le développement de pressions énormes sur le passage de la flamme, résultat parfaitement conforme à l'expérience. L'onde explosive a toujours pulvérisé sur son passage les tubes que nous employions, lorsque leur diamètre n'était pas inférieur à $0^m,01$, et dont l'épaisseur était de $0^m,002$. De semblables tubes pourraient supporter des pressions statiques de plusieurs centaines d'atmosphères. Nous avons retrouvé ces mêmes pressions considérables et instantanées dans les mesures de température de combustion faites avec l'eudio-

mètre de M. Deprez. Nous les avons obtenues avec un certain nombre de mélanges gazeux, qui se sont précisément trouvés être ceux dans lesquels MM. Berthelot et Vieille ont observé le développement de l'onde explosive.

Cette théorie rend compte également de ce fait, que les limites d'explosivité et les limites d'inflammabilité ne sont pas les mêmes, la quantité de chaleur transportée dans l'onde comprimée ne pouvant jamais être qu'une fraction de la chaleur totale de combustion.

Nous avons supposé jusqu'ici que le mode d'inflammation décidait seul du mode de propagation de la flamme. On sait qu'il en est ainsi pour un grand nombre d'explosifs solides ou liquides, la dynamite par exemple. Mais avec les explosifs gazeux, l'expérience montre qu'il en est tout autrement ; la propagation ordinaire de la combustion se transforme spontanément avec une grande facilité en propagation explosive. La théorie précédente montre que pour que cette transformation puisse se produire, il suffit qu'une tranche au moment de son inflammation se trouve, par une cause quelconque, portée à une pression convenable. Or nos expériences photographiques nous ont révélé trois causes de compression pouvant amener ce résultat :

1° Le *mouvement vibratoire* qui est accompagné de compression et détente successive. Dans les mélanges *lents* de sulfure de carbone et bioxyde d'azote, l'onde explosive prend toujours naissance pendant la période des grandes vibrations ;

2° Le *retour de l'onde comprimée*, qui se développe au moment de l'inflammation des mélanges *rapides* et va se réfléchir à l'extrémité fermée du tube. L'explosion paraît se produire ainsi dans le cas du mélange de sulfure de carbone et d'oxygène ; mais l'onde comprimée est trop faible dans les mélanges lents pour amener le même résultat ;

3° La *dilatation des gaz brûlés*, quand on enflamme le

mélange gazeux près de l'extrémité fermée du tube qui le renferme. Nous avons obtenu de cette façon l'onde explosive dans le mélange de bioxyde d'azote et de sulfure de carbone.

La théorie que nous proposons rend bien compte des principales particularités qui caractérisent la propagation par onde explosive. Elle montre pourquoi la vitesse de propagation de cette onde est constante avec la nature et les proportions du mélange gazeux. Cette vitesse ne doit être autre chose que la vitesse du son dans le mélange considéré. Il est vrai que la vitesse du son, dans les conditions expérimentales ordinaires, est beaucoup moins considérable que celle de l'onde explosive, mais il faut remarquer que cette onde se propage dans des conditions de température extrêmement différentes de celles dans lesquelles la vitesse du son a été mesurée. On sait que cette vitesse croît proportionnellement à la racine carrée du quotient de la pression du gaz par sa densité, c'est-à-dire en raison inverse de la racine carrée de la température absolue. L'échauffement dû à la combustion produirait donc une accélération analogue comme origine, sinon comme grandeur, à celle que produit normalement l'échauffement résultant de la simple compression de l'onde sonore ordinaire.

V. — Applications pratiques.

La rapidité de la propagation de la flamme joue un rôle important dans tous les phénomènes occasionnés par la combustion des mélanges gazeux. C'est d'elle que dépendent principalement la violence des *explosions du grisou* dans les mines, *les caractères indicateurs de la présence de ce gaz*, le degré de sécurité des *lampes de mines* et de

tous les autres appareils à treillis métalliques employés dans les laboratoires, tels que le chalumeau à gaz tonnant, le bon fonctionnement des *brûleurs à gaz* employés pour des usages si variés.

Nous allons rapidement passer en revue ces divers phénomènes et les étudier en leur appliquant les principes précédents.

EXPLOSIONS DE GRISOU.

Nos expériences ont montré que, dans les mélanges les plus détonants de grisou et d'air, la vitesse normale de propagation de la flamme ne dépasse pas $0^m,60$ par seconde, mais que sous l'influence d'une agitation convenable, cette vitesse peut certainement dépasser 20 mètres. Les expériences de MM. Berthelot et Vieille ont montré d'autre part que l'onde explosive ne pouvait pas se développer dans ces mélanges.

La violence plus ou moins considérable des explosions dépendra donc uniquement du degré d'agitation de l'air grisouteux pendant sa combustion ; cette agitation dépendra elle-même de la disposition des lieux et des conditions de l'inflammation.

Dans des circonstances particulières la combustion pourra avoir lieu sans explosion, la flamme se propageant avec sa vitesse normale de $0^m,60$ ou à peu près, comme cela se passe dans les tubes fermés à une extrémité quand on allume le gaz à l'extrémité ouverte. Ces conditions se trouveront remplies lorsqu'un ouvrier cherchera à pénétrer, avec une lampe à feu nu à la main, dans une galerie en cul-de-sac remplie de mélange explosif. Il n'y aura pas dans ce cas d'explosion, c'est-à-dire que la combustion ne sera accompagnée d'aucun effet mécanique, ne sera signalée par aucun bruit. Tous les dégâts seront dus soit à l'action calorifique de la flamme, soit au pouvoir asphyxiant des gaz,

Malgré la faible vitesse de la flamme, l'ouvrier auteur de l'accident aura peu de chance de s'échapper, parce que la vitesse d'écoulement des gaz brûlés, sera environ sept fois plus grande que celle de la flamme, c'est-à-dire de près de 4 mètres par seconde; il lui serait donc impossible d'éviter leur atteinte, si, comme nous l'avons supposé, la galerie est remplie tout entière du mélange le plus explosif. Le point où les effets calorifiques seront les plus intenses sera l'entrée de la galerie où passera la flamme de la totalité du mélange explosif. A l'extrémité fermée de la galerie les effets calorifiques seront relativement peu intenses, parce qu'en ce point le volume des gaz brûlés sera un minimum. C'est un fait bien connu que les ouvriers travaillant dans un chantier en cul-de-sac présentent après un accident des brûlures moins profondes que ceux qui se trouvent un peu plus loin dans la galerie. On se tromperait étrangement si on tirait de ce fait la conclusion que le chantier était relativement exempt de gaz au moment de l'explosion, et que par suite l'origine de celle-ci doit être cherchée ailleurs.

Si au contraire nous supposons l'inflammation portée à l'extrémité fermée d'une galerie en cul-de-sac, ce qui pourra être occasionné par l'ouverture d'une lampe, le tirage du coup de mine, il se produira une violente explosion signalée par un bruit intense, et produisant sur son passage des effets mécaniques redoutables; c'est qu'alors la vitesse de propagation de la flamme pourra être centuplée; les pressions produites se rapprocheront de celles que nous avons obtenues en vase clos, soit 7 atmosphères, ou 70.000 kilogrammes, par mètre carré superficiel. Il arrivera de plus que la majeure partie du mélange explosif pourra être refoulée dans des galeries d'aérage certainement exemptes de grisou en temps normal et y produire les ravages les plus effrayants. Ce fait s'est produit dans un grand nombre d'accidents de mines, et faute d'en avoir trouvé la véritable

explication, on a attribué à ces accidents des origines fort peu vraisemblables. Les explosions se produisant dans ces conditions sont doublement désastreuses, et par les effets qu'elles produisent directement, et par l'agitation qu'elles créent dans toute la mine. La violence du vent soulève les poussières et les jette dans la flamme dont elles augmentent l'intensité; les changements brusques et énormes de pression arrachent des remblais, des cloches, les amas de grisou qui y sont toujours bien plus abondants que dans les galeries; si bien qu'une mine bien aérée, et en apparence exempte de grisou, pourra être parcourue dans toute son étendue par la flamme de ce gaz. Dans les explosions de ce genre, les effets calorifiques répartis sur une plus grande étendue devraient être moins considérables si les poussières et le gaz, sortant des remblais en augmentant la quantité de chaleur totale, ne venaient pas compenser l'effet produit par une répartition différente de la flamme. Ce sera toujours dans les chantiers en cul-de-sac, même dans celui qui aura été le point de départ de l'explosion que les traces du feu seront les moindres.

Si l'on suppose enfin l'inflammation mise au milieu d'une galerie communiquant par ses deux extrémités avec le reste de la mine, et c'est là le cas général, les choses se passeront à peu près comme dans le cas précédent, à cela près que la flamme se propagera simultanément dans deux directions opposées. Si les résistances à l'écoulement du gaz sont en effet les mêmes dans les deux sens, il n'y aura pas de mouvement au point d'inflammation, ce point pourra donc être considéré comme l'extrémité fermée de deux tubes juxtaposés bout à bout. Dans le cas où la résistance serait inégale, l'explosion atteindra sa plus grande violence dans la direction de moindre résistance.

INDICATEURS DE GRISOU.

Les mineurs reconnaissent la présence du grisou dans l'atmosphère des mines à l'auréole bleue que ce gaz produit en venant brûler autour de la flamme de leurs lampes. Nous avons montré plus haut (voir p. 353) comment la chaleur fournie par une flamme un peu volumineuse pouvait, en élevant la température initiale d'un mélange naturellement ininflammable, provoquer sa combustion dans une zone d'autant plus large que le mélange est plus près de sa limite de combustibilité, et que la flamme présente un plus grand volume.

On arrive par ce procédé à reconnaître très facilement 3 p. 100 de grisou dans l'air, c'est-à-dire une quantité inférieure de moitié à celle qui correspond à la limite d'inflammabilité. Pour obtenir ce résultat, on est obligé de baisser la flamme de la lampe jusqu'à ce qu'elle ne présente plus aucun point brillant et soit devenue complètement bleue. En diminuant ainsi le volume de la flamme, on diminue aussi il est vrai celui de l'auréole; mais on augmente beaucoup d'autre part la sensibilité de la vue, qui n'étant plus éblouie par une lumière éclatante, distingue plus facilement l'auréole bleue très peu éclairante que produit la combustion du grisou.

Pour les quantités de gaz inférieures à 3 p. 100, l'auréole existe toujours, mais elle cesse d'être perceptible dans les conditions normales d'observation. Nous avons montré qu'au moyen de précautions spéciales, en cachant la flamme par un écran et surtout en faisant projeter l'auréole sur un fond d'un *noir absolu*, on arrive à la voir lorsque la proportion de grisou n'est plus que de 1/2 p. 100.

Enfin on peut même arriver à déceler la présence de 1/4 p. 100 seulement de ce gaz dans l'atmosphère des mines, en remplaçant la flamme de la lampe à huile par

celle de l'hydrogène, qui, tout en présentant une température très élevée, a un éclat lumineux extrêmement faible. Nous renverrons, pour plus de détails au mémoire que nous avons publié antérieurement sur ce sujet dans les *Annales des mines* (*).

APPAREILS DE SURETÉ A TREILLIS MÉTALLIQUE.

Nous avons vu que la flamme d'un mélange gazeux donné ne peut traverser un tube que lorsque celui-ci a un diamètre suffisant, diamètre qui dépend de la vitesse propre du mélange. Pour les tubes plus étroits, la flamme s'éteint en diminuant progressivement d'étendue, après avoir pénétré dans le tube d'une certaine longueur comparable à son diamètre. Si le tube était plus court que cette longueur, il ne pourrait évidemment pas s'opposer à la propagation de la flamme. Ces quelques principes permettent d'expliquer aisément le rôle des toiles métalliques qui peuvent être considérées comme formées par la juxtaposition d'un grand nombre de tubes très courts. Une semblable toile placée au milieu d'une masse gazeuse *en repos* arrêtera la flamme, et par suite amènera son extinction pour tous les mélanges dont la vitesse de propagation est inférieure à une certaine valeur. Il est impossible de donner une relation précise entre la valeur de cette vitesse et l'ouverture qu'il faut donner aux mailles, parce que la longueur du tube que forme chaque maille varie avec le diamètre du fil employé. Ainsi les mélanges les plus détonants de grisou et d'air ne traversent pas un tube de $0^m,0032$ de diamètre, mais ils traverseraient à coup sûr une toile métallique présentant des ouvertures de ce diamètre. La détermination des dimensions convenables pour éteindre la

(*) *Annales des mines*, 7ᵉ série, t. XIX, p. 186.

flamme dans les conditions que nous avons admises, ne présente du reste aucun intérêt au point de vue pratique ; car on ne trouve jamais remplie la condition que nous avons admise, l'immobilité absolue du mélange gazeux. Le chiffre que l'on obtiendrait ne serait donc qu'un maximum dont il faudrait toujours se tenir très éloigné.

En réalité un mélange gazeux en combustion est toujours animé de mouvements intérieurs résultant de la *diminution de densité* des gaz brûlés qui occasionnent des mouvements de circulation verticale, de la *dilatation* des gaz brûlés qui occasionne un mouvement de sortie des gaz hors de l'appareil où ils sont enfermés, enfin des *causes extérieures* à l'appareil qui peuvent occasionner soit des mouvements dans la masse gazeuse, soit le mouvement de l'appareil dans la masse gazeuse en repos.

Ces mouvements modifient du tout au tout les conditions de sécurité des toiles; en premier lieu la flamme, au lieu de s'éteindre contre la toile faute d'aliment, comme cela a lieu dans un mélange gazeux en repos, continue à brûler par suite du renouvellement du gaz; la toile s'échauffe donc, et aussi le mélange gazeux qui traverse ses orifices; la vitesse de propagation augmentant avec la température, il faudra donner à la toile des mailles d'autant plus étroites qu'elle pourra être portée à une température plus élevée. La température à laquelle elle sera portée dépend du reste de la rapidité de la circulation des gaz, de la quantité de chaleur dégagée par leur combustion, et enfin de l'étendue de la surface rayonnante, c'est-à-dire du diamètre des fils qui limite seul l'élévation de température.

Ces mouvements modifient encore la sécurité des toiles en changeant la longueur à laquelle pénètre la flamme dans les tubes; elle augmente ou diminue cette longueur, suivant que le sens du mouvement est ou non concordant avec celui de la propagation de la flamme.

Nous ferons une application sommaire de ces principes

généraux à quelques-unes des lampes de sûreté employées dans les mines et à quelques appareils de laboratoire.

Lampe Davy. — Cette lampe est formée par un treillis métallique cylindrique entourant la flamme d'une mèche à huile. Plongée dans un mélange gazeux explosif, elle se remplit de gaz qui s'allume à un moment donné à la flamme, se propage de proche en proche jusqu'au treillis, et y arrive avec une certaine vitesse causée par la dilatation des gaz brûlés. Un calcul très simple montre que cette vitesse croît proportionnellement aux dimensions du treillis ; elle sera donc d'autant plus grande que le treillis sera plus grand. De ce fait la sécurité décroît donc, au moins en théorie, si l'on augmente les dimensions de la lampe. En fait ce danger n'existe pas avec la lampe de dimensions usuelles. Nous n'avons jamais pu obtenir de cette façon le passage de la flamme, en remplaçant le grisou par du gaz d'éclairage et la flamme de la lampe par une étincelle électrique, deux circonstances qui aggravent certainement le danger.

La flamme arrivée contre le treillis s'y arrête donc sans le traverser ; mais elle ne s'éteint pas non plus, parce que, par suite de la diminution de densité des gaz brûlés, il se produit une circulation qui fait continuellement arriver par la base de la lampe des nouvelles quantités de gaz frais. Le treillis s'échauffe et rougit ; la température stationnaire qu'il prendra sera d'autant plus élevée que la circulation du gaz est plus rapide, c'est-à-dire que la hauteur du treillis est plus grande, et le rapport des vides aux pleins plus petit. L'expérience montre qu'il est possible de trouver des dimensions convenables telles que le tamis puisse rougir sans cependant communiquer le feu au dehors. Mais la sécurité qu'offre la lampe dans ces conditions est extrêmement précaire ; le moindre courant d'air, la moindre agitation de la lampe, suffit pour faire passer la flamme au dehors. Nos expériences, d'accord avec les expériences antérieures, ont

montré qu'une vitesse de 2 mètres par seconde suffit pour produire cet effet.

Lampe Mueseler. — Dans cette lampe la flamme est entourée par un verre ; une cheminée placée au milieu sert à évacuer les produits de la combustion et une toile métallique horizontale ferme l'espace annulaire compris entre la base de la cheminée et le verre. Enfin un treillis métallique de même diamètre que le verre recouvre la cheminée. La flamme est donc séparée de l'air extérieur par deux toiles métalliques. Dans la marche normale, la flamme ayant toute sa hauteur, l'air pur arrive de haut en bas sur la flamme en passant par la toile métallique horizontale ; les gaz brûlés s'en vont par la cheminée qui en est remplie. Si la lampe vient à être portée dans cet état au milieu d'un mélange explosif, le gaz vient s'allumer sur la flamme et tout le verre se remplit de feu. La flamme arrive sur l'anneau de toile métallique horizontal avec une vitesse plus grande qu'elle ne le fait dans la lampe Davy, par suite du rapport plus grand du volume du gaz enfermé dans la lampe à la section totale des orifices d'écoulement. Il ne paraît pas cependant que dans ces conditions la flamme puisse traverser la toile métallique. Nous n'avons jamais observé le passage en bouchant la cheminée, remplaçant le grisou par du gaz d'éclairage, et la flamme par une étincelle électrique, trois circonstances qui aggravent considérablement le danger. La flamme ne peut pas davantage, dans les conditions normales, passer par la cheminée, qui est remplie des produits de la combustion. Enfin la flamme arrivée contre l'anneau de toile horizontal s'éteint, parce que, en conséquence de cette disposition, il ne tend pas à se produire d'appel de gaz froids et non brûlés. On voit donc pourquoi cette lampe présente un degré de sécurité considérable ; la toile ne peut pas s'échauffer, de plus elle est à peu près complètement à l'abri

des courants d'air. Le treillis extérieur ne serait même donc pas indispensable.

Nous avons supposé dans ce qui précède la lampe en marche normale, c'est-à-dire avec une grande flamme. Mais lorsque la mèche est très basse et donne une toute petite flamme, ce qui rend plus facile la constatation de petites quantités de gaz dans l'air de la mine, la cheminée n'est plus remplie des produits de la combustion. Si la lampe est portée alors dans un mélange explosif, la flamme pourra se propager par l'intérieur de la cheminée dans le cylindre extérieur, et l'on se retrouvera alors dans les conditions défectueuses de la lampe à simple treillis métallique. Mais de plus la flamme sortira par la cheminée avec une certaine vitesse, par suite de la dilatation des gaz brûlés dans l'intérieur du cylindre du verre ; elle conservera encore une partie de cette vitesse en arrivant contre le fond supérieur du treillis et pourra le traverser immédiatement. C'est ainsi que l'on peut rendre compte des expériences curieuses de M. Marsaut sur la lampe Mueseler. Il ne faut pas cependant exagérer outre mesure la gravité de ce danger, car nous n'avons réussi à faire sortir ainsi la flamme de la lampe Mueseler, qu'en remplaçant le grisou par du gaz d'éclairage, la flamme de la lampe par une étincelle électrique, et en remplaçant l'anneau de toile métallique horizontal par un écran plein pour réduire les orifices d'écoulement du gaz. Ce sont là évidemment des conditions bien éloignées de celles de la pratique.

Ces deux exemples suffisent pour montrer comment les phénomènes de propagation de la flamme interviennent dans la théorie des lampes de sûreté, et comment l'application peut en être faite à des types différents de ceux que nous avons étudiés.

Appareils de laboratoires. — Dans les expériences sur les mélanges explosifs, on emploie souvent des toiles mé-

talliques destinées à empêcher l'inflammation de se propager jusqu'au réservoir renfermant le mélange gazeux. C'était le cas, par exemple, de l'ancien chalumeau à gaz tonnant avec lequel on brûlait un mélange préparé à l'avance d'hydrogène et d'oxygène. Nous avons fait nous-mêmes dans nos expériences un usage continuel des toiles métalliques. Les quelques considérations qui vont suivre ne sont donc pas d'ordre exclusivement théorique, ce sont surtout des résultats de notre expérience personnelle.

Le fait principal à connaître dans l'emploi des toiles métalliques, est que, quelles que soient les précautions prises, elles se laissent toujours un jour ou l'autre traverser par la flamme, et souvent sans qu'il soit possible de préciser la cause qui a occasionné cet accident, ni par suite de prendre les précautions voulues pour éviter son retour. Cependant dans la majorité des cas le passage de la flamme résulte de la compression occasionnée par l'écoulement des gaz brûlés qui amène le refoulement des gaz non brûlés à travers la toile métallique, circonstance la plus désastreuse au point de vue de la sécurité des toiles. Cette compression anormale résulte tantôt d'une obstruction involontaire des orifices d'écoulement, tantôt d'une agitation accidentelle du gaz qui amène une augmentation de la vitesse de propagation, et par suite du volume des gaz brûlés dans l'unité de temps.

On augmente la sécurité des toiles en les superposant; cela revient à augmenter leur épaisseur; on se rapproche des tubes d'une longueur finie et on diminue considérablement l'effet de la vitesse du gaz. En laissant, au contraire, un certain intervalle entre les toiles, on perd tout le bénéfice de l'augmentation de leur nombre. Quand la première est traversée toutes les autres le sont aussi. Les gaz brûlés après le passage de la première toile, éprouvent un accroissement de résistance qui augmente le refoulement en arrière, et par suite favorise le passage de la flamme à travers les secondes toiles.

Pour obtenir d'une toile métallique la plus grande sécurité possible, il faut la disposer de façon que le rapport de sa surface au volume du mélange combustible avec lequel elle est en contact soit le plus grand possible, et ménager aux gaz brûlés des orifices de sortie considérables ; enfin ces précautions prises, il ne faut pas oublier qu'un jour ou l'autre la flamme réussira à traverser cette toile métallique.

Les mélanges les plus explosifs avec lesquels nous avons employé les toiles métalliques sont ceux de gaz d'éclairage et d'air, dont la vitesse maxima est de 1^{m},20 par exemple. En voyant la facilité avec laquelle ils arrivaient à traverser nos toiles métalliques, qui étaient celles que l'on emploie pour les tamis des lampes, c'est-à-dire faites avec du fil de fer ayant 144 mailles au centimètre carré, nous n'avons pas jugé prudent d'en faire l'expérience avec des mélanges plus rapides ; nous employions toujours pour ceux-là un joint hydraulique, c'est-à-dire que nous faisions dégager le mélange gazeux bulle à bulle à travers une certaine épaisseur d'eau.

Enfin nous considérons qu'il est impossible d'arrêter avec une chance de sécurité quelconque la flamme des mélanges détonants formés par l'oxygène. Nous ne ferons d'exception que pour celui qu'il forme avec l'oxyde de carbone, dont la vitesse de propagation est relativement très lente, soit 2 mètres par seconde. Les autres mélanges traversent en effet sans difficulté des tubes en cuivre de 1/4 de millimètre de diamètre et 2 mètres de long, c'est-à-dire douze fois plus étroits que ceux qui arrêtent complètement la flamme des mélanges les plus explosifs de grisou et d'air. Il faudrait donc employer avec ces mélanges des toiles dont les mailles seraient certainement beaucoup plus de douze fois plus petites que celles que l'on emploie dans les lampes de sûreté, dont la sécurité elle-même n'est pas absolue.

Bec Bunsen.

La théorie du fonctionnement du bec Bunsen a été donnée depuis longtemps, elle se trouve même dans des ouvrages d'enseignement élémentaire. Nous croyons cependant utile de la reproduire ici avec quelques développements, car elle est généralement peu connue.

Dans cet appareil le mélange de gaz d'éclairage et d'air est produit dans un tube dont les deux extrémités communiquent librement à l'air extérieur ; un jet de gaz sortant d'un orifice étroit est lancé suivant l'axe du tube; il entraîne l'air avec lequel il se mêle, et le mélange sort avec une certaine vitesse par l'autre extrémité près de laquelle on l'enflamme. La vitesse de propagation du mélange doit être inférieure à celle d'écoulement du gaz. La flamme peut alors se tenir d'une façon permanente sur l'orifice du tube.

On peut calculer approximativement la vitesse d'entraînement du gaz au moyen de la formule

$$mV = (M + m)v,$$

ou en remplaçant la masse par le produit des vitesses par les densités, admettant que la densité du gaz est moitié de celle de l'air, et tenant compte de ce fait que le mélange le plus détonant de gaz et d'air renferme pour 1 vol. de gaz 7 vol. d'air

$$V = 14v.$$

On peut calculer V en fonction de la pression du gaz dans les conduites, et prenant pour cette pression le chiffre minimum de $0^m,04$ d'eau, on trouverait V = 200 mètres, d'où on tirerait

$$v = 7^m.$$

chiffre bien supérieur à la vitesse normale de propagation de la flamme dans le gaz d'éclairage, qui ne dépasse pas $1^m,20$.

Mais une fois le mélange gazeux allumé, les conditions de l'écoulement changent, la dilatation des gaz brûlés les oblige à prendre une vitesse d'écoulement supérieure qui entraîne une compression en arrière. En tenant compte de ce fait et admettant que la dilatation des gaz brûlés est de 7 fois, on trouvera que la vitesse d'entraînement maxima est de 2 mètres par seconde, chiffre encore supérieur, mais de peu de chose, à la vitesse de propagation de la flamme, surtout si l'on remarque que nous n'avons pas tenu compte de l'étranglement des orifices d'arrivée d'air. En fait, la vitesse d'entraînement est à peu près égale à celle de propagation de la flamme; l'équilibre est donc tout à fait instable, de telle sorte que la flamme finit toujours par rentrer dans un brûleur réglé pour donner le mélange gazeux le plus combustible.

On évite cet inconvénient en augmentant l'écart entre ces deux vitesses par différents artifices. On diminue la proportion d'air entraînée en réduisant le diamètre du tube; on accélère ainsi la vitesse d'entraînement du mélange gazeux tout en diminuant sa vitesse de propagation; on peut encore diminuer la vitesse de propagation en donnant à l'orifice des formes particulières, dans lesquelles le rapport du périmètre à la section soit très grand; on augmente ainsi l'influence refroidissante des parois, au moins tant qu'elles ne sont pas trop échauffées par le contact de la flamme. Ce résultat est obtenu avec les becs annulaires ou en forme de fente, avec les couronnes percées de trous, etc. Ces appareils permettent de brûler le mélange le plus explosif de gaz et d'air sans être exposé à une rentrée immédiate de la flamme.

La flamme du bec Bunsen présente un cône intérieur brillant d'un éclat supérieur au reste de la flamme. C'est la tranche en combustion, dont la température, comme nous l'avons expliqué plus haut, est supérieure à celle du reste de la flamme. La forme conique résulte de l'inégale

vitesse des filets gazeux qui circulent dans le tube. Ceux qui longent la paroi ont une vitesse inférieure à celle de propagation de la flamme; celle-ci la remonte donc jusqu'au point où elle se trouve arrêtée par l'action refroidissante des parois, et elle se tient ainsi collée sur les lèvres de l'orifice. De là elle se propage vers le centre du courant gazeux avec sa vitesse normale, et est en même temps entraînée dans le sens de ce courant avec la vitesse propre de chacun des filets gazeux qu'elle atteint, vitesse qui croît de la périphérie vers le centre. Elle décrit ainsi des lignes inclinées sur l'axe du tube dont l'ensemble forme une surface conique. On voit que la longueur de ce cône est d'autant plus grande que la vitesse de propagation est plus faible; pour les mélanges non combustibles renfermant un excès de gaz, il disparaît complètement en se confondant avec la surface extérieure de la flamme.

VI. — Résumé.

En résumé nos expériences sur la propagation de l'inflammation dans les mélanges gazeux combustibles, ont démontré les faits suivants :

L'inflammation dans ces mélanges peut se propager suivant deux modes principaux. L'un, qui se fait par transmission de la chaleur d'une tranche à la tranche voisine, est le *mode de propagation par conductibilité*, ou *propagation normale*. L'autre, qui se fait par la transmission d'une pression suffisamment élevée, est la propagation par *onde explosive* découverte par MM. Berthelot et Vieille.

Ces deux modes de propagation correspondent à la *déflagration* et à l'*explosion* des substances explosives liquides ou solides comme la nitroglycérine ou la dynamite.

Chacun de ces deux modes de propagation est caractérisé par une vitesse constante et spécifique pour un mélange donné dans des conditions données de température.

Entre ces deux modes réguliers se placent un certain

nombre d'autres modes dont la production dépend des conditions expérimentales et qui ne sont pas susceptibles de définitions précises.

La vitesse de propagation par conductibilité ne dépasse et probablement même n'atteint jamais 20 mètres par seconde. Nous l'avons déterminée pour un certain nombre de mélanges gazeux.

Pour les mélanges d'hydrogène et d'air, la vitesse de propagation maxima est de $4^{m},30$ environ. Elle est obtenue pour un mélange contenant 40 p. 100 d'hydrogène, c'est-à-dire plus que le mélange tonnant qui en contient 30 p. 100.

Les mélanges de formène (grisou) et d'air sont beaucoup plus lents. La vitesse maxima est seulement de $0^{m},62$. Elle serait obtenue pour un mélange renfermant 12,2 de formène, c'est-à-dire plus que le mélange tonnant qui en renferme 9,4 p. 100.

Pour le gaz d'éclairage (au moins celui sur lequel nous avons expérimenté), la vitesse maxima serait de $1^{m},25$. Elle serait obtenue pour un mélange contenant 17 p. 100 de gaz, c'est-à-dire encore un peu plus que le mélange tonnant qui contiendrait 15 p. 100 seulement de gaz.

Pour le mélange tonnant d'oxyde de carbone et d'oxygène, la vitesse de propagation est de 2 mètres par seconde seulement.

Les mélanges d'hydrogène ou de formène avec l'oxygène ont des vitesses de propagation plus grandes, que nous n'avons pu mesurer avec précision. Nous sommes arrivés cependant à montrer que le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène ne doit pas avoir une vitesse de propagation supérieure à 20 mètres.

La vitesse de propagation augmente avec la température initiale. Dès que le tube dans lequel se fait la propagation est un peu large, la vitesse de propagation est indépendante du diamètre du tube. Dans les tubes étroits la vi-

tesse diminue avec le diamètre et peut même s'annuler pour un diamètre d'autant plus petit que le mélange est plus rapide.

Toute agitation dans le mélange gazeux où progresse la flamme augmente la vitesse de propagation, ainsi que l'avaient déjà reconnu MM. Schlœsing et de Mondésir.

Lorsque la propagation se fait dans un mélange à propagation lente et dans un tube fermé à une extrémité, si l'inflammation est portée près de cette extrémité, la progression de la flamme dans le tube prend une vitesse beaucoup plus grande et en même temps une allure saccadée qui se traduit par des oscillations très irrégulières. L'éclat de la flamme est alors plus grand dans la période oscillatoire qui accélère la progression de la flamme que dans celle qui la retarde. Il peut même arriver, avec des tubes suffisamment étroits, que la flamme s'éteigne dans cette dernière période lorsque l'oscillation est très forte.

Avec tous les mélanges gazeux, la progression de la flamme dans un tube se fait d'abord avec la vitesse uniforme de la propagation par conductibilité. Au bout d'un certain temps, d'autant plus court en général que le mélange est plus rapide, la flamme prend un mouvement vibratoire dont les amplitudes éprouvent des variations considérables. Dans ce mouvement vibratoire l'éclat de la flamme est toujours plus grand dans la période de vibration en avant que dans la période de vibration en arrière. Il peut même arriver, lorsque l'amplitude est grande, que la flamme s'éteigne durant cette dernière période.

Lorsque, par une cause quelconque, mouvement vibratoire, dilatation des gaz brûlés, etc., la pression transmise par une tranche gazeuse à la tranche contiguë est égale à celle qui élève le gaz à la température d'inflammation, la combustion se propage avec la même vitesse que l'onde comprimée. On a alors l'*onde explosive.*

EXPLICATION DES PLANCHES.

Planche VIII.

Les figures 1 et 2 représentent l'appareil qui nous a servi à déterminer les *températures d'inflammation* par la méthode du *pyromètre*. Un four Perrot renferme deux pyromètres en porcelaine servant : l'un *a* de chambre de combustion ; il est relié à un tube mesureur *c* ; le second *b* de thermomètre à air ; il est relié à un manomètre à mercure *d*.

Les figures 3 et 4 représentent l'appareil employé pour faire les mêmes expériences par la méthode du *tube* :

a Tube en porcelaine où s'enflamme le mélange gazeux ;
b Thermomètre à air ;
c Grille à pétrole servant au chauffage ;
d Réservoir de pétrole.

La figure 5 est un diagramme théorique représentant la répartition des températures de part et d'autre de la tranche en combustion A dans une masse gazeuze en train de brûler :

θ Température initiale ;
t Température d'inflammation ;
T Température de combustion.

La flèche indique le sens de propagation de la flamme.

La figure 6 est la courbe figurative des vitesses de propagation de la flamme dans les mélanges d'hydrogène et d'air. Les ordonnées représentent les vitesses exprimées en mètres par seconde et les abscisses la quantité du gaz combustible renfermée dans 100 volumes de mélange total.

La figure 7 donne la courbe analogue pour les mélanges de formène (grisou) et d'air.

Planche IX.

Cette planche représente le chronographe enregistreur qui nous a servi dans nos expériences sur les *vitesses de propagation* et sur les *températures de combustion*.

On voit à côté du cylindre le moteur électrique à vitesse constante qui lui imprime un mouvement de rotation uniforme.

On a placé sur le chariot qui se déplace devant le cylindre les électro-aimants qui nous ont servi pour quelques-unes de nos expériences sur les

vitesses de propagation dans lesquels nous utilisions pour produire les signaux la *conductibilité électrique* du gaz chaud.

Enfin on a représenté sur le cylindre quelques-unes des courbes que nous avons obtenues dans nos expériences sur les vitesses de propagation par la méthode *pneumatique*. La courbe de droite est celle d'un diapason enregistreur battant le 1/100 de seconde.

Planches X et XI.

Ces planches donnent des reproductions des courbes que nous avons obtenues par la méthode *photographique* pour la mesure des vitesses de propagation.

Ces expériences se rapportent toutes à des mélanges de sulfure de carbone, soit avec le bioxyde d'azote, soit avec l'oxygène.

Les tubes en verre dans lesquels se fait la propagation de la flamme sont placés verticalement et la flamme avance sur les figures du bas vers le haut. — Le sens d'entraînement de la feuille est de la gauche vers la droite, sauf dans les expériences planche X et figure 7, planche XI, où il est inverse.

Sur toutes ces courbes le point *a* est à l'origine de la combustion et par suite aussi de la période de propagation uniforme; le point *b* à la fin de la propagation uniforme et au commencement du mouvement vibratoire; le point *c* aux plus grandes vibrations.

INDICATION des courbes.	NATURE des mélanges.	DIAMÈTRE des tubes.	LONGUEUR représentant 1 mètre.	LONGUEUR représentant 1 seconde.	REMARQUES.
Planche X.		mèt.	mèt.	mèt.	
Fig. 1. . . .	$CS^2 + 3AzO^2$	0,03	0,20	0,48	Le mouvement vibratoire continue jusqu'à la fin de la combustion.
— 2. . . .	Id.	Id.	Id.	Id.	Onde explosive *e*.
— 3. . . .	Id.	Id.	Id.	Id.	Vibrations énormes; le bouchon qui ferme le tube est projeté.
Planche XI.					
Fig. 1. . . .	$CS^2 + 3AzO^2$	0,02	0,28	0,12	
— 2. . . .	Id.	Id.	Id.	Id.	
— 3. . . .	Id.	Id.	Id.	Id.	
— 4. . . .	Id.	0,01	Id.	0,15	
— 5. . . .	$CS^2 + 6O$	0,03	0,03	1,00	Onde explosive.
— 6. . . .	Id.	0,01	Id.	Id.	Id.
— 7. . . .	$CS^2 + 3AzO^2$	0,03	0,04	Id.	Mélange enflammé par l'extrémité fermée du tube.

RECHERCHES
EXPERIMENTALES ET THÉORIQUES
SUR LA
COMBUSTION DES MÉLANGES GAZEUX EXPLOSIFS

Par MM. MALLARD et LE CHATELIER,
Ingénieurs au corps des mines.

TROISIÈME MÉMOIRE.
SUR LES TEMPÉRATURES DE COMBUSTION
ET LES
CHALEURS SPÉCIFIQUES DES GAZ AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES.

INTRODUCTION.

Toute combustion s'accompagne d'un certain dégagement de chaleur qui élève la température des corps brûlés. La température à laquelle seraient ainsi portés ces corps, si on les supposait, pendant la combustion, complètement isolés dans l'espace, de manière à ne pouvoir recevoir de l'extérieur, ni lui communiquer aucune quantité de chaleur, est appelée la *température de combustion.*

Il serait très intéressant de connaître, pour les mélanges gazeux explosifs, cette donnée physique. Non seulement, comme nous le verrons plus tard, on peut en tirer grand parti au point de vue théorique, mais il est évident qu'elle

intervient dans toutes les opérations industrielles, si multipliées, où l'on utilise les flammes pour porter un corps à une température donnée. La température de combustion de la flamme employée est en effet la température maxima à laquelle le corps ainsi chauffé peut être porté.

On a cru pendant longtemps pouvoir calculer la température de combustion en ayant pour seules données les *chaleurs de combustion*, et les *chaleurs spécifiques* des gaz mesurées dans les conditions ordinaires de température et de pression.

Soit Q la chaleur de combustion, C la chaleur spécifique moyenne, entre 0° et la température de combustion T, du gaz brûlé; ramenons l'unité de poids de ce gaz à 0° sans lui permettre de se condenser, il abandonnera une quantité de chaleur CT, et nous aurons, par définition

$$Q = CT. \qquad (1)$$

Il semble donc qu'il suffise, pour calculer T, de connaître Q et C.

Les travaux anciens de Dulong, de Favre et Silbermann, et surtout les travaux récents de MM. Thomsen et Berthelot (*), ont fait connaître Q pour un nombre considérable de combustions, ou, plus généralement, de réactions chimiques. D'un autre côté, les chaleurs spécifiques des principaux gaz ont été mesurées par Regnault, aux températures ordinaires, avec une grande précision.

Malheureusement, deux causes empêchent de tirer un parti direct, pour calculer T, de la formule précédente.

La première, c'est que cette formule repose sur la supposition que, si nous avons mis en présence les poids de gaz qui, par la combustion, peuvent donner naissance à 1 gramme

(*) L'Annuaire du Bureau des longitudes publie, chaque année, un tableau très étendu des valeurs de Q, qui a été rédigé par M. Berthelot, en grande partie d'après ses propres travaux.

du gaz composé considéré, il s'est réellement formé 1 gramme de vapeur de ce gaz. C'est en effet à cette condition seulement qu'il nous est permis de dire que la quantité de chaleur dégagée par la combustion est égale à Q. S'il se formait seulement un poids p du gaz composé, le reste des gaz mis en présence demeurant non combiné, il est évident que la quantité de chaleur dégagée serait seulement pQ et qu'il faudrait, pour aller plus loin, connaître p.

Or on sait, depuis les mémorables travaux d'Henri Sainte-Claire Deville, que cette dernière supposition est précisément réalisée dans un très grand nombre de cas, la plupart des gaz composés, portés à une température suffisamment élevée, se *dissociant* partiellement en leurs éléments. Si par exemple on met en présence 1/3 de volume de O et 2/3 de volume de CO, et, si on provoque la combinaison, il ne se formera pas 1 gramme de CO^2, parce que la combustion porte l'acide carbonique à une température assez grande pour que ce gaz se dissocie partiellement en CO et O.

Une autre cause vient encore compliquer la question. La chaleur spécifique C qui intervient dans la formule (1) est la chaleur spécifique moyenne entre 0° et T. Or, l'expérience ne nous donne que les chaleurs spécifiques moyennes entre 0° et une température qui ne dépasse pas 200°. Pouvons-nous admettre que les chaleurs spécifiques restent les mêmes aux températures voisines de la température ordinaire et aux températures élevées que développe la combustion?

On pourrait, à la rigueur, admettre, d'après les expériences de Regnault, que les chaleurs spécifiques des gaz parfaits, qui suivent sensiblement les lois de Mariotte et de Gay-Lussac, sont constantes avec la température. Mais Regnault avait constaté que la chaleur spécifique de l'acide carbonique s'accroît notablement de 0° à 200°, et on igno

rait si cet accroissement se continue à mesure que la température augmente. Il est vrai que l'on admettait assez généralement qu'il n'en était pas ainsi. On supposait que l'invariabilité de la chaleur spécifique était un caractère essentiel à l'état gazeux parfait. Or comme l'acide carbonique s'approche de plus en plus de cet état gazeux parfait en satisfaisant de mieux en mieux à la loi de Mariotte à mesure que la température est plus élevée, et qu'il s'éloigne davantage de son point de liquéfaction, on supposait que la chaleur spécifique de ce gaz devait s'approcher de plus en plus de l'invariabilité.

Les expériences qui font l'objet de ce mémoire ont précisément démontré que cette hypothèse est erronée, que la chaleur spécifique de l'acide carbonique s'accroît sans cesse avec la température jusqu'à prendre, à 2000°, plus du double de sa valeur à 0°, et que les gaz parfaits eux-mêmes obéissent, quoiqu'à un degré beaucoup moindre, à cette loi générale d'accroissement.

Il faut donc abandonner l'espoir de déduire les températures de combustion de la seule connaissance des chaleurs de combustion et de celle des chaleurs spécifiques mesurées à 0°. Il ne reste plus, pour connaître ces températures, qu'à recourir à l'observation directe.

Malheureusement cette observation présente de nombreuses difficultés pratiques qui ont, pendant longtemps, presque absolument découragé les observateurs. Aussi n'avait-on, sur l'ordre de grandeur des températures de combustion, que des idées extrêmement vagues ; la température de combustion du mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène, par exemple, étant évaluée tantôt à 7.000°, tantôt à 3.000°.

L'illustre chimiste d'Heidelberg, M. Bunsen, a proposé et appliqué, en 1867, pour mesurer les températures de combustion, un procédé fort ingénieux. Il consiste à enfermer le mélange gazeux combustible en vase clos, à le faire

détoner, puis à mesurer la pression très élevée et instantanée que développe la combustion. Cette pression est liée à la température de combustion par un certain nombre d'équations faciles à établir.

Soit

h la pression initiale du mélange gazeux;
τ_0 la température *absolue* initiale;
Π la pression immédiatement après la combustion, et avant que le refroidissement de l'enceinte ait pu se faire sentir;
τ la température *absolue* de combustion;
1 le volume du gaz tonnant, à h et τ_0;
v le volume du gaz étranger mêlé au gaz tonnant, aussi à h et τ_0;
u le volume qu'occupe, après la combustion, le gaz brûlé formé par 1^v de gaz tonnant, si on le ramène à h et τ_0; lorsque le mélange tonnant est par exemple celui de H et O, ou celui de CO et O, on a $v = \frac{2}{3}$;
k la proportion du volume du mélange tonnant qui s'est combinée, de sorte que le volume du gaz engendré par la combustion est ku;
c la chaleur spécifique moyenne du mélange tonnant, à volume constant, entre τ_0 et τ, et rapportée à l'unité de volume;
c' la même donnée pour le gaz étranger ajouté;
c_1 la même donnée pour le gaz brûlé;
Q la chaleur de combustion rapportée à l'unité de volume du gaz brûlé.

L'équation (1) des quantités de chaleur deviendra évidemment

$$kuQ = [(1-k)c + vc' + kuc_1](\tau - \tau_0). \qquad (2)$$

Le gaz avant la combustion occupait, avec une pression h et une température τ_0, le volume de l'enceinte qui, d'après nos définitions, est représenté par $1 + v$, Immédiatement après la combustion, la masse gazeuse occupe le même volume $1 + v$ avec une pression Π et une température τ. Cette même masse, ramenée à τ_0 et à la pression h occuperait, toujours d'après nos définitions, le volume $1 - k + ku + v$. On

aura donc

$$\frac{h(1-k+ku+v)}{\tau_0}=\frac{\Pi(1+v)}{\tau}. \qquad (3)$$

Lorsque $u=1$, c'est-à-dire lorsque la combustion n'est pas suivie d'une contraction ou d'une expansion des gaz, l'expression (1) se réduit à

$$\frac{h}{\tau_0}=\frac{\Pi}{\tau} \qquad (4)$$

et donne immédiatement τ en fonction de Π. C'est ce qui arrive, par exemple, pour les mélanges de Cl et H.

Dans le cas général, si l'on admet, avec M. Bunsen, que c, c' c_1 sont des constantes données par l'observation faite à la température ordinaire, les deux équations réunies (2) et (3) ne contiennent que deux inconnues qui sont la température absolue de combustion τ et la proportion k de gaz tonnant qui s'est combinée. L'observation de la pression Π permet donc de calculer k et τ.

M. Bunsen employait, pour ses expériences, un eudiomètre en verre, fermé en bas, ouvert en haut, de 0^{m}0117 de diamètre et de 0^{m}0815 de hauteur. L'eudiomètre, rempli de mélange détonant, avait son ouverture supérieure obturée par une sorte de soupape de sûreté sur laquelle on exerçait une pression connue au moyen d'un levier chargé de poids. L'inflammation était provoquée par une étincelle électrique. Si la pression développée par la combustion était supérieure à celle qui s'exerçait sur la soupape, celle-ci se soulevait et l'on en était averti par le bruit de l'échappement. On pouvait ainsi, par des tâtonnements successifs, comprendre la pression cherchée Π entre deux pressions, aussi rapprochées qu'on le voulait, l'une trop faible, l'autre trop élevée.

Voici le tableau des résultats obtenus :

NUMÉROS des expériences.	GAZ mélangé à 1 volume de gaz tonnant.	$\frac{\Pi}{h}$	TEMPÉRATURE de combustion,	QUANTITÉ DE GAZ entrée en combinaison k
			les chaleurs spécifiques étant supposées constantes.	
		Mélanges d'hydrogène.		
12	0	9,97	2870°	0,348
1	0	9,75	2853	0,324
14	1,26 Az	7,49	2163	0,595
		Mélanges d'oxyde de carbone.		
2	0	10,78	3192°	0,361
1	0	10,19	2875	0,324
3	0,108 O	9,05	2573	0,319
8	0,686 CO	8,89	2478	0,466
4	0,855 O	8,44	2332	0,487
5	1,086 O	7,86	2128	0,499
11	1,256 Az	7,73	2096	0,523
10	1,256 Az	7,35	1875	0,468
6	1,71 O	6,67	1739	0,540
7	2,16 O	5,83	1426	0,498
9	3,16 CO	4,79	1132	0,515

On remarquera que les nombres qui expriment la proportion de gaz entrée en combinaison restent presque rigoureusement constants et égaux à 0,5 jusques et y compris l'expérience 8 qui correspond, d'après M. Bunsen, à la température 2.478°. Pour les températures supérieures, la proportion combinée reste encore constante, mais elle est égale à 0,3 ou sensiblement 1/3. M Bunsen concluait de là qu'aux températures inférieures la moitié seulement des gaz en présence entre en combinaison, tandis qu'au-dessus d'une certaine température déterminée, ce n'est plus que le tiers de ces gaz qui participe à la réaction. Il y aurait ainsi un rapport toujours simple entre les volumes de gaz qui se combinent, mais ce rapport irait en diminuant, par sauts brusques, à mesure que la température s'élève.

M. Vicaire (*), dans une savante dissertation sur les lois de la dissociation à propos des expériences de M. Bunsen, fit voir que la singulière conclusion de l'illustre savant ne pouvait être admise et n'était point, en tout cas, suffisamment appuyée sur les résultats de ses expériences.

M. Berthelot (**) critiqua à un autre point de vue les conclusions de M. Bunsen, en faisant remarquer que rien ne prouvait la constance, avec la température, des chaleurs spécifiques des gaz; tout au moins de ceux, comme l'acide carbonique, pour lesquels les expériences de Regnault montraient, entre 0° et 200°, un accroissement notable. Si cette constance n'avait pas lieu, il y avait en réalité, dans les deux équations (2) et (3), non pas deux inconnues k et τ, mais cinq, k, τ, c, c', c_1 que l'observation de la pression Π était tout à fait insuffisante à déterminer.

M. Henri Sainte-Claire Deville, auquel la science est redevable de découvertes si capitales au sujet de la combustion des gaz et qui, le premier, a posé le principe de la dissociation, avait, avant Bunsen, essayé de mesurer la température de combustion de quelques mélanges gazeux, entre autres du mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène (***). Il plongeait dans la flamme produite par ce mélange, au milieu de vases de chaux peu conducteurs, des masses de platine ou d'iridium fondus, versait ensuite ces masses dans l'eau et observait l'élévation de température de l'eau. Malheureusement les données sur lesquelles on est obligé de s'appuyer, telles que la chaleur latente de fusion de platine, et la chaleur spécifique de ce métal au-dessus de 2.000°, sont très incertaines L'illustre savant avait été conduit ainsi au chiffre de 2.500° pour la température de combustion à pression constante du mélange tonnant $H^2 + O$.

(*) *Ann. chim. et phys.* (4), 19. 1870.
(**) *Ann. sc. de l'Ec. norm. sup.*
(***) *Leçons sur les dissociations*. 1864.

M. Crova (*), par des recherches optiques sur l'intensité des radiations lumineuses des flammes, est arrivé à comparer entre elles ces intensités et à déterminer ainsi, pour les différentes flammes, des températures qu'il appelle *optiques* et qui n'ont d'ailleurs aucun rapport bien défini avec les températures mesurées sur le thermomètre à air. Il a cru cependant pouvoir fixer à 1.900° la flamme d'une lampe modérateur alimentée par l'huile de colza.

De son côté M. Rossetti (**), aussi par des mesures optiques, crut pouvoir fixer à 1.300° la température de la couche extérieure bleue d'une flamme en papillon, et à 1.150° celle de la couche intérieure blanche.

Ces mesures, quand même on admettrait qu'elles sont susceptibles d'une grande précision, ne donnent point la température de combustion d'un mélange gazeux donné, mais seulement la température de la partie la plus chaude de la flamme qui, d'après ce que nous avons dit dans une autre partie de ce travail, doit être à une température plus élevée que celle de combustion, puisque la température de la zone en combustion est à peu près égale à la somme de la température d'inflammation et de celle de combustion.

Nos propres expériences sur les températures de combustion ont été faites dans le courant des années 1880 et 1881. Un compte rendu sommaire, contenant l'énoncé de nos principaux résultats en fut donné, à la fin de cette dernière année, dans les *Comptes rendus de l'Académie des sciences* (***), et ensuite, presque sans modifications, dans divers autres Recueils (****).

Depuis cette époque, M. Vieille (*****) a fait connaître les

(*) *Ann. de ch. et de phys.* (5), 19, p. 472. 1880.
(**) *Ann. chim. et phys.* (5), 18, p. 457. 1879.
(***) *Comptes rendus*, 5, 12, 19 décembre 1881.
(****) *Séances de la Société de physique*, 2 décembre 1881; *Journal de phys.*, 1882; *Bull. Soc. chim.*, 1883.
(*****) *Comptes rendus*, XCVI, 23 avril, 16 mai 1883.

principaux résultats de recherches faites sur le même sujet par un procédé d'expérimentation notablement différent du nôtre. M. Vieille fait détoner le gaz dans une bombe sphérique et mesure la pression *maxima* que développe la combustion en enregistrant la loi du déplacement d'un piston de section et de masses connues. Les résultats de M. Vieille sont en général d'accord avec les nôtres.

Enfin, pendant l'impression même de ce mémoire, M. Berthelot et Vieille publient, dans les *Comptes rendus*, les résultats d'une longue série d'expériences faites par le procédé qu'avait d'abord employé M. Vieille seul. Ces résultats, ainsi que les conséquences auxquels ils conduisent, sont à peu près constamment d'accord avec les nôtres, en tenant compte du degré d'approximation qu'il est permis d'espérer dans des recherches de ce genre.

En publiant aujourd'ui nos expériences avec détail, nous avons refait complètement tous les relevés de nos graphiques et tous les laborieux calculs qui permettent d'en tirer parti. Nous avons été ainsi conduits à adopter, pour ces calculs, de nouveaux procédés, et nos premiers résultats en ont été quelque peu modifiés. Nous avons cru avoir le droit d'améliorer de la sorte notre propre travail. Au reste les changements que nous avons apportés à nos premiers nombres ne dépassent pas les limites d'erreur que nous avions nous-mêmes indiquées et laissent subsister toutes les conclusions que nous avions formulées.

CHAPITRE I.

PREMIÈRE SÉRIE D'EXPÉRIENCES AVEC LE MANOMÈTRE DEPREZ.

Lorsque la Commission du grisou nous confia le soin de faire des expériences sur les propriétés explosives du grisou, nous songeâmes à mesurer la pression exercée par la combustion de ce gaz en vase clos, et à déduire de cette pression la température de combustion. Nous nous proposâmes en même temps d'étendre ces recherches à d'autres gaz combustibles.

Il s'agissait de reprendre les expériences de M. Bunsen en évitant autant que possible les causes d'erreur qui avaient pu les affecter. La principale de ces causes d'erreur nous parut être le défaut d'instantanéité dans l'appareil qui mesurait la pression. Pour que l'on pût juger en effet que la pression développée par la combustion était supérieure à celle qu'exerçait le poids agissant sur le levier, il fallait que la soupape pût se soulever et le poids se déplacer d'une certaine quantité. Ce mouvement, bien que d'une faible amplitude, exigeait cependant un certain temps pour se produire. Avant que la soupape ne fût soulevée, le gaz avait donc le temps de se refroidir, ce qui diminuait d'autant la pression intérieure.

Description de l'appareil. — Pour éviter cet inconvénient, nous eûmes recours à un ingénieux appareil dû à M. Deprez.

La combustion était provoquée par une étincelle électrique excitée en *i* (*fig.* 1, pl. XII), au centre d'une éprouvette cylindrique E, qui avait des dimensions plus grandes que celles de M. Bunsen, soit $0^{m},10$ de hauteur et $0^{m},05$ de diamètre intérieur.

Le haut de l'éprouvette était fermé par une plaque en fer percée de deux orifices correspondant aux deux tubulures à robinets *a* et *a'* par lesquelles se faisait l'introduction et la sortie du gaz. La manœuvre s'effectuait aisément au moyen d'un tube en caoutchouc communiquant avec la partie inférieure de l'éprouvette, et liée à un flacon F rempli de mercure. En abaissant ou en élevant ce flacon, on remplissait l'éprouvette de mercure ou l'on y faisait le vide.

La base inférieure de l'éprouvette était percée d'un orifice communiquant à l'indicateur de pression représenté en coupe dans la partie gauche de la planche (*fig.* 1'). Il était formé par un tube fixe CC, dans lequel jouait un piston *p* fermant exactement. Le piston était fixé à une tige T, aboutissant à un crochet H, et limitée dans sa course ascendante par un rebord qui venait s'appuyer sur la base d'un tube DD simplement enfilé sur le tube CC. La tige portant le piston était d'ailleurs maintenue en place par un ressort à boudin *r* s'appuyant d'une part sur le piston *p*, d'autre part sur un écrou *e*, vissé dans le cylindre mobile DD.

En faisant tourner la manivelle M, on donnait, par l'intermédiaire de la roue dentée R, un mouvement de rotation au cylindre CC, et l'écrou intérieur *e* montait ou s'abaissait en comprimant ou détendant le ressort à boudin *r*. Un indicateur extérieur *j* donnait à chaque instant la position intérieure de l'écrou *e*; il faisait ainsi connaître, au moyen d'une graduation préalable, l'état de tension du ressort, et par suite la grandeur de la pression qui devait être exercée sur la base supérieure de surface connue du piston *p* pour lui permettre de s'abaisser.

Sur la tige T du piston était enfilée une petite languette L en métal très mince que la tension du ressort maintenait pressée entre le rebord B de la tige et la base du cylindre DD. Cette languette portait une ouverture rectangulaire qui lui permettait de glisser horizontalement lorsque la

pression du ressort cessait de s'exercer. Pour la solliciter à ce glissement, un poids P agissait sur elle par l'intermédiaire d'un cordon horizontal porté sur une petite poulie.

Le gaz explosif remplissant le cylindre, on poussait la languette de manière qu'elle fût le plus enfoncée possible, et on exerçait, en tournant le ressort et la languette, une pression *h* mesurée par l'index *j*. On provoquait l'étincelle, et si la pression développée par la combustion sur le piston *p* était égale ou supérieure à celle qu'exerçait le ressort, la pression devenait nulle sur la languette, qui cédait à l'action du poids P. Dans le cas contraire, la languette restait en place. On pouvait ainsi, par des tâtonnements successifs, comme dans les expériences de M. Bunsen, comprendre la pression développée par la combustion entre deux pressions très rapprochées.

Le grand avantage de cette ingénieuse disposition, due à M. Deprez, c'était que l'on pouvait constater la production d'une pression maxima, si fugitive qu'elle fût. La languette ayant en effet une très petite masse, prenait sous l'action du poids P relativement grand, un déplacement grand dans un temps très court. Nous nous sommes assurés que la languette se déplaçait de 1 centimètre en moins de 1/200 de seconde.

Le ressort était taré directement au moyen de poids suspendus au crochet H. Cette graduation ne présentait pas de difficultés, mais elle devait être répétée assez souvent, car la force du ressort variait notablement avec le temps.

Incertitude des résultats donnés par l'observation. — Nous avons fait, avec cet appareil, un très grand nombre d'expériences, avant d'être amené à reconnaître que, malgré tous nos efforts, il ne donnait que des résultats incertains, souvent même illusoires.

La principale cause d'erreur se trouvait dans un phénomène très inattendu et qui ne nous fut expliqué que lorsque nous eûmes terminé nos expériences sur le mode de propagation de l'inflammation. Voici en quoi ce phénomène consistait.

Avec certains mélanges gazeux, la languette commençait à prendre un léger mouvement lorsque la pression exercée sur le ressort était évidemment encore bien supérieure à celle que pouvait produire la combustion. Le déclanchement n'était pas complet et la languette n'accomplissait pas toute sa course; elle se déplaçait néanmoins, et ce déplacement indiquait avec certitude qu'à un moment donné il s'était développé sur la base supérieure du cylindre, une pression au moins égale à celle du ressort. Cette pression ne s'était, il est vrai, exercée que pendant un temps extrêmement court, car le déplacement était quelquefois de 2 ou 3 millimètres seulement, et, comme nous l'avons dit, la languette parcourait au moins un centimètre dans 1/200 de seconde.

Ces déplacements partiels se manifestaient souvent pour des pressions du ressort très supérieures à celles pour lesquelles se produisait le déplacement complet. On en jugera par le compte rendu des quelques expériences suivantes faites avec des mélanges, en proportion variable, d'hydrogène et d'oxygène.

Tensions du ressort en tours du cylindre DD.	1° 0,4 O + 0,6 H
23	Déplacement de la languette certain, mais inférieur à 1^{mm},
20	Déplacement de 2^{mm},
21	— 1^{mm}
22	— 1^{mm}
19	— 3^{mm}
17	Déclenchement complet.

2° 0,15 O + 0,85 H

11	Déclenchement complet,
13	Id.
15	Déplacement de 1^{mm},
16	— 2 à 3^{mm},
17	— 1^{mm}
18	— 2^{mm}
19	— moins de 1^{mm}.

3° 0,25 O + 0,75 H

22	Pas de déplacement,
20	Id.
18	Id.
16	Déplacement de 1 à 2^{mm},
15	Déclenchement complet.
15,5	Id.
16	Déplacement de 2 à 3^{mm},
17	Déclenchement complet,
17	Déplacement de 1^{mm}.

Comme on le voit d'après ces quelques exemples, que nous pourrions multiplier considérablement, le phénomène est des plus variables et la grandeur du déplacement n'est pas, avec un même gaz, en rapport avec la tension du ressort ; il peut même y avoir, sous la même tension, tantôt déclenchement complet, tantôt déplacement seulement partiel de la languette.

Cause des anomalies constatées par l'observation. — La cause de ce phénomène singulier nous a beaucoup intrigués.

Nous avons d'abord reconnu qu'il ne se produisait que pour les mélanges à propagation rapide, tels que les mélanges d'hydrogène et d'oxygène (particulièrement ceux qui contiennent un excès d'hydrogène), les mélanges d'hydrogène et d'air avec un excès d'hydrogène, les mélanges d'oxyde de carbone et d'oxygène voisins du mélange tonnant ou contenant un excès d'oxyde de carbone, les mélanges de

grisou et d'oxygène. Les mélanges à propagation lente, tels que ceux de grisou et d'air, d'oxyde de carbone et d'air, ne le présentaient pas ou ne le présentaient qu'à peine.

Il est maintenant clair pour nous, que les déplacements partiels de la languette étaient dus à la trop grande sensibilité de notre appareil qui lui permettait d'indiquer la production des pressions les plus fugitives.

Lorsque l'onde enflammée se propage, elle exerce, comme nous l'avons exposé dans notre second mémoire, sur la tranche immédiatement en contact une pression considérable, d'abord restreinte exclusivement à cette tranche, et qui, au bout d'un temps très court, mais non pas nul, se transmet par la détente à toute la masse, en s'affaiblissant naturellement par le partage.

Cette pression très fugitive est d'autant plus grande que la vitesse de propagation est plus considérable. Elle peut devenir énorme, comme nous l'avons remarqué, avec l'onde explosive. C'est à ces pressions, si instantanées qu'elles soient, que sont dus les surprenants effets des substances explosives telles que la nitroglycérine.

Ce sont précisément ces pressions passagères, sans relation directe avec le phénomène que nous voulions mesurer, qu'enregistrait notre appareil. Il se trouvait ainsi défectueux par l'exagération même des qualités qui nous l'avaient fait adopter.

Il semble que l'on aurait pu remédier à cette cause d'erreur en tenant pour non avenus les déplacements incomplets de la languette. Mais que faire lorsque le déclenchement était presque complet? D'ailleurs on voit, par le dernier des exemples cités plus haut, que sous la même pression et avec le même mélange, le déplacement peut être tantôt complet, tantôt incomplet.

Il fallait donc renoncer à tirer parti des expériences faites avec les mélanges à propagation rapide. Mais pouvait-on au moins utiliser celles qui avaient été faites avec des

mélanges à propagation lente? Nous ne l'avons pas pensé, car on n'est plus certain, dans ce cas, que l'influence du refroidissement de la paroi ne vient pas diminuer la pression que l'on mesure.

Il faut en effet remarquer qu'il ne suffit pas d'avoir un enregistreur de pressions donnant avec certitude la pression maxima, si peu de temps qu'elle dure, développée effectivement dans le cylindre. Sous ce rapport l'appareil de M. Deprez est parfait, et il a fait ses preuves entre nos mains mêmes, puisqu'il a pu indiquer l'existence de pressions extraordinairement fugitives.

Mais si le vase dans lequel le gaz est enfermé n'est pas rigoureusement sphérique, si l'inflammation n'est pas rigoureusement provoquée au centre, si la propagation ne se fait pas rigoureusement suivant des surfaces sphériques concentriques, certaines parties du mélange gazeux enflammé arrivent à toucher les parois et à se refroidir avant que la propagation ne soit terminée; la pression maxima qui s'exerce dans l'enceinte n'est plus alors celle qui s'exercerait si la masse gazeuse, était portée tout entière et au même instant, à la température de combustion. Cette dernière pression qui est justement celle que l'on cherche, ne se produit donc pas réellement dans le vase et ne peut pas par conséquent être mesurée, lorsque toutes les conditions précitées ne sont pas remplies.

En comparant, avec les pressions obtenues par une autre méthode plus exacte, celles que nous avions obtenues avec la méthode qui vient d'être exposée, nous avons en effet reconnu que ces dernières, presque identiques au reste avec celles qu'avait trouvées M. Bunsen, étaient toutes trop faibles pour les mélanges à propagation lente.

Nous jugeons donc inutile de donner les résultats obtenus dans cette première période de nos recherches. Nous avons cru cependant qu'il était bon de signaler au moins notre insuccès, parce que les causes qui l'ont motivé sont une

conséquence des principes exposés dans une autre partie de notre travail. Si nous les avions connus alors, nous n'aurions pas le regret d'avoir consacré de longues heures à des recherches vaines.

Ayant renoncé à tirer parti des expériences faites avec notre premier appareil, nous nous occupâmes d'en faire construire un autre mieux disposé pour arriver au résultat désiré et éviter les causes d'erreur que nous avions reconnues.

CHAPITRE II.

DEUXIÈME SÉRIE D'EXPÉRIENCES AVEC LE MANOMÈTRE ENREGISTREUR BOURDON.

PREMIÈRE PARTIE.

PROCÉDÉS D'OBSERVATION.

Description de l'appareil employé. — Avertis de la production, pendant la propagation, de pressions considérables et fugitives, sans rapport direct avec celle que nous voulions mesurer, nous résolûmes, en premier lieu, d'abandonner l'indicateur de pression qui nous avait servis jusque-là, et dont l'exquise sensibilité devenait un défaut grave. Nous pensâmes ensuite que le meilleur moyen de mesurer la pression due à la combustion, et de la dégager des pressions anormales qui nous avaient si fort gênés, c'était d'observer, non pas seulement la pression maxima développée dans l'eudiomètre, mais encore la marche de la pression depuis le moment où l'inflammation est provoquée

jusqu'à celui où commence la période de refroidissement.

Les variations de la pression étant connues d'une manière continue, il devait être possible de déterminer le maximum qui nous intéressait.

Il fallait d'abord que la pression ne variât pas trop brusquement, au moins sous l'influence du refroidissement; dans ce but nous augmentâmes considérablement les dimensions de l'eudiomètre, qui dut être alors métallique. Nous songeâmes naturellement à donner à notre eudiomètre la forme sphérique qui était évidemment la plus rationnelle. Nous nous laissâmes malheureusement arrêter par des difficultés de construction, qui auraient occasionné un assez long retard. Nous ne pensions pas, à vrai dire que le choix de la forme sphérique, pût avoir une très grande importance. Nous ne croyions pas alors que la propagation pût se faire, dans une large enceinte, suivant des surfaces sphériques concentriques et régulières, tant était irrégulière et capricieuse la propagation que nous avions observée dans un tube.

L'expérience nous a démontré plus tard qu'il n'y a aucun rapport entre ces deux modes de propagation; que dans les tubes la régularité de la propagation est troublée par des vibrations qui ne prennent pas naissance dans un large vase. Nous avons alors amèrement regretté de n'avoir pas persisté dans notre première idée; nous aurions ainsi accru notablement la précision de nos expériences et considérablement simplifié la correction destinée à tenir compte de l'influence du refroidissement.

Dans une sphère en effet, la propagation se faisant très régulièrement, comme nous l'avons reconnu, la flamme arrive presqu'en même temps, si l'inflammation est bien centrale, toucher les parois du vase. Au moment où commence la période de refroidissement, toute la masse gazeuse est donc enflammée, et à cet instant il se développe dans l'enceinte une pression sensiblement égale à celle que l'on

veut mesurer. Il n'en est pas de même avec toute autre forme, et la correction qu'il faut faire subir aux observations devient plus grande et plus incertaine.

Quoi qu'il en soit, renonçant à la forme sphérique, faute d'en connaître tous les avantages, nous nous contentâmes de nous en rapprocher en donnant à notre cylindre une base circulaire dont le diamètre était égal à la hauteur. Ces deux dimensions étaient égales à $0^{m},17$, de sorte que la capacité de notre enceinte était égale à $3^{lit},86$.

Ce cylindre en fer, à fonds plats convenablement boulonnés portait à sa partie supérieure quatre ouvertures. L'ouverture centrale laissait passage à un tube t (*fig.* 1, pl. XVIII), mastiqué avec de la cire Golaz, pour pouvoir être facilement retiré et replacé. Il contenait deux fils isolés, dont les extrémités inférieures étaient disposées en regard au centre du cylindre et donnaient passage à l'étincelle excitée du dehors au moment voulu.

Sur l'une des ouvertures latérales était fixé à demeure un tube t_1, pourvu d'un robinet et communiquant par un tube en plomb avec une trompe à eau ou une machine pneumatique. Sur une autre ouverture était fixé un autre tube t_2 également pourvu d'un robinet et communiquant par un tube métallique capillaire à un manomètre à mercure. Le manomètre que nous employions consistait en un simple tube en verre muni d'une division en millimètres, et plongeant dans une large cuvette remplie de mercure; on n'avait ainsi à faire qu'une lecture, tandis que le manomètre représenté à tort sur la figure en exigerait deux.

Enfin sur la dernière ouverture supérieure était fixé un tube t_3 muni d'un robinet par lequel les gaz étaient introduits.

Le cylindre C tout entier était plongé dans une cuve remplie d'eau de manière à maintenir sa température plus constante et à la mesurer aisément. On pouvait aussi par ce procédé empêcher la rentrée du gaz dans l'intérieur du

cylindre, dans le cas où la pression intérieure était plus basse que la pression atmosphérique.

La base inférieure du cylindre ne portait qu'une large ouverture sur laquelle était fixé à demeure un tube T pourvu d'un robinet à grand orifice R. Ce tube venait s'adapter au moyen d'une soudure sur un manomètre construit et imaginé par M. Bourdon.

Il consiste en un tube en laiton L à section elliptique tordu en hélice et rempli d'eau, ou mieux de glycérine. Ce tube, ouvert du côté qui communique à T, est fermé à l'autre extrémité qui porte un petit arbre *a* mobile sur un support *f*. Sur ce petit arbre est fixée une longue aiguille *l*. Lorsqu'une pression s'exerce sur le liquide qui remplit L, le tube elliptique tend à se détordre, l'arbre *a* tourne et entraîne avec lui l'aiguille *l*. Le mouvement angulaire de cette aiguille, ou ce qui revient au même, le déplacement circulaire de son extrémité, est sensiblement proportionnel à la pression exercée.

L'aiguille *l* doit être rigide et légère ; nous l'avions formée d'un de ces piquants de porc-épic dont on se sert pour les porte-plumes. Elle portait à l'extrémité un style formé d'une lame triangulaire de baleine, amincie et légèrement recourbée à la pointe. Ce style venait faire un tracé sur un papier noirci, recouvrant le cylindre E décrit dans notre second mémoire. Ce cylindre était mis en mouvement par un petit moteur électrique Deprez, imprimant un mouvement de rotation bien uniforme.

Pour que la pression exercée dans le cylindre se transmît le plus rapidement possible au manomètre, le tube T était rempli d'eau, et le fond du cylindre lui-même était baigné par une couche d'eau extrêmement mince.

Cet appareil très simple et très robuste nous a donné de fort bons résultats.

Graduation du manomètre. — Pour graduer le ma-

nomètre, on le mettait en communication avec un tube flexible en acier rempli de mercure, et dont l'extrémité libre pouvait être suspendue à des hauteurs variables depuis o mètre jusqu'à 8^m,60. Cette dernière hauteur représentait une pression qui n'a pas été dépassée dans nos expériences. Le style du manomètre marquait, sur le cylindre tournant ordinaire recouvert de papier noirci, la position correspondant à des hauteurs mesurées de la colonne mercurielle. On mesurait en centimètres les écartements y compris entre la position du style qui correspondait à une hauteur nulle de la colonne mercurielle et celle qui correspondait à la hauteur h. On reliait les observations faites dans la même série d'expériences par une formule de la forme.

$$h = ay + by^2$$

dont les résultats de l'expérience déterminaient les coefficients a et b.

Voici les diverses séries de graduations qui ont été faites;

I. 18 mars 1881.

Série 1.

$$h = 0.854\,y - 0.0057\,y^2$$

y	h Observé.	h Calculé.
2^c,30	1^m,89	»
4 ,81	3 ,84	3^m,88
10 ,15	7 ,87	»

Série 2.

$$h = 0,849\,y - 0,0094\,y^2$$

y	h Observé.	h Calculé.
3^c,60	2,94	»
6 ,76	5,39	5,31
8 ,29	6,40	»

On prend la moyenne des séries 1 et 2, en calculant les valeurs moyennes de h données par les deux formules pour $x=1$ et $x=10$. On obtient ainsi la formule moyenne

Formule moyenne.

$$h = 0{,}843\,y - 0{,}0077\,y^2$$

y	h Observé.	h Calculé.
2°,30	1ᵐ,89	1,90
3 ,60	2 ,94	2,93
4 ,81	3 ,84	3,87
6 ,76	5 ,39	5,35
8 ,29	6 ,40	6,46
10 ,15	7 ,87	7,77

II. 15 juillet 1881.

$$h = 0{,}797\,y - 0{,}0045\,y^2$$

y	h Observé.	h Calculé.
5°,21	4ᵐ,03	»
11ᵐ,50	8,57	»

III. 9 janvier 1882.

$$h = 0{,}742\,y - 0{,}0015\,y^2$$

y	h Observé.	h Calculé.
1,85	1ᵐ,28	1,32
5,15	3,78	»
1,14	8,31	»

Il résulte de ces observations que le ressort a subi avec le temps, et sous l'influence des observations faites, des variations qui ont graduellement affaibli l'élasticité. Cette variation est démontrée par la comparaison des nombres suivants :

		$y=1$	$y=5$	$y=10$
I.	18 mars 1881 (moy.). $h=$	$0^m,835$	$4^m,02$	$7^m,66$
II.	15 juillet 1881	0 ,79	3 ,87	7 ,52
III.	9 janvier 1882. . . .	0 ,74	3 ,67	7 ,27

Pour rendre moins difficiles les nombreux calculs auxquels nous avons dû nous livrer, nous avons employé, pour la transformation des longueurs mesurées y en hauteurs de mercure h, une formule moyenne entre les trois formules qui représentent l'état du ressort les 18 mars 1881, 15 juillet 1882, et 9 janvier 1883. Cette formule avait été mise sous la forme d'un abaque au moyen duquel la transformation de y en h était très rapide. Le résultat définitif auquel on arrivait, était corrigé en tenant compte de la date de l'observation. Cette correction était d'ailleurs toujours faible.

Durée d'une vibration du manomètre. — Lorsque le manomètre était brusquement soumis à l'effet d'une pression élevée, il se produisait des vibrations que le style inscrivait sur le cylindre. En inscrivant en même temps les vibrations d'un diapason battant la seconde, on avait le moyen de constater la durée des vibrations du manomètre. Nous avons trouvé que cette durée est restée sensiblement constante pendant toutes nos observations, et égale à $0^s,0305$. Cette unité de temps se trouvait naturellement inscrite sur presque tous nos graphiques, car il était rare que le manomètre n'entrât pas en vibration sous l'influence de la pression brusquement développée par la combustion. C'est cette unité que nous avons constamment employée dans tous nos calculs. Il était facile de ramener ensuite tous les résultats à la seconde pour unité, lorsque cela était nécessaire.

Détail d'une observation. — Voici maintenant comment se faisait une observation. Supposons par exemple qu'il

s'agisse d'un mélange d'hydrogène et d'air. Le cylindre C contient en général les produits gazeux d'une expérience antérieure; on y fait le vide le moins imparfait possible avec la trompe ou la machine pneumatique et on laisse rentrer l'air; on fait le vide de nouveau, on remplit encore d'air et ainsi de suite. Lorsqu'on juge que l'air qui remplit l'appareil est suffisamment pur, on fait le vide jusqu'à ce que la colonne du manomètre à mercure s'arrête à la hauteur h_1. On ferme alors la communication avec la machine pneumatique et l'on fait arriver l'hydrogène. Le gaz est préparé dans un appareil continu qu'on met directement en communication avec le cylindre. On arrête l'introduction de l'hydrogène lorsque la colonne mercurielle a une hauteur h_2. On laisse alors rentrer l'air dans l'appareil en ayant soin que la vitesse d'arrivée soit assez considérable pour opérer un brassage intérieur. On s'arrête lorsque la colonne de mercure a une hauteur égale à h_3. On observe enfin la pression atmosphérique H et la température θ_0 de l'eau qui enveloppe le cylindre.

On a ainsi introduit dans le cylindre un volume d'hydrogène proportionnel à $h_1 - h_2$, et un volume d'air proportionnel à $H - h_3$, à la température θ_0. Seulement il faut remarquer que, les gaz étant saturés, le volume d'air $H - h_3$ contient un volume égal (ou proportionnel) à la tension de la vapeur à la température θ_0. Cette correction, toujours assez faible, a cependant quelque importance dans certains cas.

Ceci fait, on ferme tous les robinets, sauf celui qui ouvre la communication avec le manomètre enregisteur L. On dispose sur le cylindre E un papier que l'on noircit au noir de fumée, et on le met en mouvement au moyen du moteur électrique. Le style trace alors sur le papier une section droite du cylindre qui correspond à la pression intérieure $H - h_3 = h$.

Lorsque l'on juge que le cylindre a pris sa vitesse nor-

male, on en approche un diapason battant le centième de seconde et qui inscrit ses vibrations. En même temps on lance l'étincelle ; la combustion se produit, l'aiguille du style est écartée de sa position et vient tracer sur le papier noirci une ligne continue dont les ordonnées, à partir de la ligne décrite avant la combustion, sont, à chaque instant, proportionnelles à l'excès $\varpi - h$ de la pression variable ϖ du gaz sur la pression initiale h. Il s'agit, bien entendu, d'ordonnées circulaires ayant pour centre le centre de rotation de l'aiguille l, ou plutôt une courbe rendue un peu plus complexe par ce fait qu'elle est tracée sur un cylindre et non pas sur un plan.

Nous venons de dire que ces ordonnées sont proportionnelle à la pression $\varpi - h$; hâtons-nous d'ajouter qu'il n'en serait ainsi que si l'on pouvait négliger l'accélération du style. Cette accélération, qui produit au départ, au moins dans le plus grand nombre des cas, des vibrations plus ou moins énergiques peut être regardée comme négligeable, lorsque ces vibrations sont éteintes.

Dès que la combustion est terminée, on ouvre le robinet r_2, qui rend libre la communication avec le manomètre à mercure, et l'on note la hauteur h_4 de la colonne mercurielle qui reste suspendue dans le manomètre, lorsque le refroidissement du gaz intérieur paraît complet. La pression intérieure du gaz est alors, à la température θ_0, égale à $H - h_4 = p_0$. La différence

$$h - p_0 = h_4 - h_2$$

est la contraction ou la dépression produite par la combustion. L'observation de cette donnée sert très utilement à contrôler la proportion des gaz mélangés et à s'assurer que la combustion s'est faite régulièrement.

Toutes les données de l'observation, ainsi que la date et le numéro d'ordre, sont inscrites sur le papier noirci, que l'on détache du cylindre, que l'on passe dans une dissolu-

tion de gomme-laque par l'alcool et qu'on laisse ensuite sécher. Les feuilles, préparées ainsi, peuvent être conservées indéfiniment et constituent des documents que l'on peut toujours consulter. Les tracés sont inaltérables, et l'on peut écrire sur la feuille au moyen d'une plume trempée dans du blanc à la gouache.

La *fig.* 9, pl. XV, donne la réduction d'une des courbes tracées par le style. Nous reviendrons plus tard sur l'interprétation de cette courbe.

SECONDE PARTIE.

RÉSULTATS DES OBSERVATIONS.

I. — Phénomènes chimiques.

Nous commencerons par donner quelques détails sur les particularités que nous avons observées au sujet du phénomène purement chimique de la combustion.

Précautions prises pour la préparation des gaz. — Les gaz introduits dans l'appareil étaient préparés avec soin au moment même de l'expérience, pour éviter l'altération qui se produit toujours dans les gazomètres.

L'oxygène était préparé avec du chlorate de potasse placé dans une petite cornue en verre; le gaz qui se dégageait se rendait directement dans l'appareil après avoir traversé un flacon laveur.

L'oxyde de carbone provenait de l'action de l'acide sulfurique sur le formiate de potasse. Les deux réactifs, dans les proportions convenables indiquées par M. Berthelot, étaient placés dans une cornue en verre, et une chaleur ménagée dégageait le gaz qui se rendait directement dans l'appareil. Des précautions analogues étaient prises pour le cyanogène.

Quant au grisou, il était préparé par le procédé que nous avons indiqué dans notre premier mémoire. Il était recueilli dans un gazomètre à eau, mais nous faisions en sorte de l'utiliser le plus rapidement possible.

Contraction du volume. — L'observation de la contraction du volume des divers mélanges expérimentés a donné lieu aux remarques suivantes :

Mélanges combustibles formés par l'hydrogène. — Pour les mélanges dans lesquels l'élément combustible était l'hydrogène, la contraction observée a généralement été très voisine de la contraction théorique; sauf pour quelques expériences évidemment fautives et qui ont été rejetées, la différence a été de l'ordre des erreurs d'observation.

Mélanges combustibles formés par l'oxyde de carbone. — Il en était encore de même pour les mélanges dans lesquels l'élément comburant était l'oxyde de carbone, lorsqu'il n'y avait pas un excès d'oxyde de carbone. Dans ce dernier cas, la contraction observée était assez notablement plus faible que la contraction théorique. C'est ce qui résulte des nombres suivants :

DATES [1].	VOLUME de gaz ajouté à 1v de CO+O.	CONTRACTION théorique en millimètres de mercure.	CONTRACTION observée en millimètres de mercure.	DIFFÉRENCE.
1 VII, 7	0,305 O	175	173	− 2
1 VII, 6	1.17 CO	105	102	− 3
1 VII, 5	0,56 CO	146	127	−19
1 VII, 4	0,63 CO	140	120	−20
13 VII, 2	0,00	123	125	+ 2

[1] Ainsi que dans tout ce qui suivra, le premier chiffre arabe de la date est le quantième du mois, le chiffre romain le numéro d'ordre du mois dans l'année; le dernier chiffre arabe est le numéro d'ordre parmi les expériences faites le jour considéré.

L'explication de ce fait se trouve dans l'action que l'oxyde de carbone exerce sur la vapeur d'eau à des températures même assez peu élevées. Il se forme de l'acide carbonique et de l'hydrogène. Le volume n'est pas changé, mais comme le gaz cesse d'être saturé, de nouvelles quantités de vapeur d'eau se mélangent au gaz, dont le volume final est augmenté. Cette réaction étant progressive et postérieure à la combustion ne pourrait avoir d'influence un peu sensible que sur la marche du refroidissement.

Mélanges combustibles formés par le cyanogène. — Avec les mélanges où l'élément comburant est le cyanogène, on n'observe, ce qui est d'accord avec la théorie, aucun changement de volume lorsque l'air et le cyanogène sont mélangés de manière que l'oxygène puisse brûler tout le gaz à l'état de CO^2.

Lorsque le cyanogène est en excès et que l'oxygène est juste suffisant pour brûler le gaz à l'état de CO, on n'observe qu'une augmentation de volume inférieure à l'augmentation théorique. C'est ce qui résulte de l'expérience (4 XI, 3) dans laquelle on a constaté une augmentation de volume égale à 97 seulement, l'augmentation théorique étant égale à 107. Dans cette expérience, nous avons observé la production de 4 à 5 p. 100 d'acide carbonique, qu'on peut attribuer au moins en partie à l'action de l'oxyde de carbone sur la vapeur d'eau.

L'expérience (7 XI, 1) faite avec un mélange, en proportions égales, de cyanogène et d'oxygène, donne une augmentation de volume égale à 120 au lieu de l'augmentation théorique 97. Cette augmentation trop grande s'explique par la production de l'acide carbonique qui était, dans le gaz brûlé, en proportion de 15 p. 100. La formation de ce gaz peut elle-même s'expliquer en partie par l'action de l'oxyde de carbone sur la vapeur d'eau, action d'autant plus grande que, par suite de la faible densité donnée au

mélange gazeux initial ($h = 201^{mm}$ seulement), la proportion relative de vapeur d'eau dans le gaz était très grande.

Mélanges combustibles formés par le grisou. — Les mélanges combustibles formés par le grisou (CH^4) et l'air ont donné lieu à des remarques intéressantes. Les contractions observées sont contenues dans le tableau suivant :

NUMÉROS.	DATES.	V_f volume du grisou.	V_0 volume d'oxygène.	CONTRACTION observée.	CONTRACTION théorique en supposant le grisou brûlé en CO^2 et H^2O.	CONTRACTION calculée par la formule $C = 2(V_0 - V_f)$.
			1° *Mélanges de grisou et d'air.*			
1	11 VI, 7	52	145	97	104	»
2	11 VI, 4	52	145	97	104	»
3	3 V, 2	60	143	107	120	»
4	11 VI, 3	61	143	108	122	»
5	11 VI, 9	70	138	130	140	»
6	2 VII, 3	71	136	129	»	130
7	11 III, 1	75	140	130	»	130
8	11 VI, 2	76	140	127	»	128
9	3 V, 1	81	139	113	»	116
10	11 VI, 8	81	139	116	»	116
11	11 VI, 5	85	138	105	»	106
12	11 VI, 6	95	136	82	»	82
			2° *Mélange de grisou et d'oxygène.*			
13	13 VII, 1	134	247	205	»	226

On remarquera d'abord que les expériences sont concordantes, c'est-à-dire qu'elles donnent les mêmes contractions lorsque les proportions de gaz sont les mêmes, bien que le grisou employé ne provienne pas de la même fabrication. C'est ce dont on peut s'assurer en comparant les expériences 3 et 4 faites l'une en mai, l'autre en juin; les expériences 5 et 6 faites l'une en juin, l'autre en juillet; les expériences 7 et 8 faites l'une en mars, l'autre en juillet.

Lorsque le volume du grisou est inférieur à la moitié de

celui de l'oxygène, ce dernier gaz est suffisant pour brûler le grisou à l'état de CO^2 et HO^2 suivant la formule



$$CH^4 + 2O^2 = CO^2 + 2H^2O.$$

S'il n'y avait pas condensation, il n'y aurait pas changement de volume, mais, l'eau se condensant, il y a 4 volumes perdus, c'est-à-dire précisément le volume de l'oxygène employé, qui est lui-même le double de celui du grisou. La contraction observée devait donc être égale au double du volume du grisou. En réalité la contraction observée a toujours été notablement moindre, ce qui tient sans doute à ce que le gaz, préparé suivant les procédés indiqués, contient quelque autre gaz plus riche en carbone que le formène.

Pour les mélanges contenant un volume de grisou supérieur au double de volume du l'oxygène, on ignore de quelle manière se fait la combustion. Il est à remarquer cependant que, dans ce cas, on obtient presque exactement la contraction observée en doublant l'excès de volume d'oxygène sur le volume du grisou, $2(V_0 - V_f)$. C'est ce qui résulte de la comparaison de la dernière colonne du tableau avec l'antépénultième.

II. — Étude des tracés graphiques.

La *fig.* 9, Pl. XV, représente, réduit de moitié, le graphique obtenu dans l'expérience (4 XI, 3) faite avec un mélange de cyanogène et d'air.

Pour interpréter ce tracé, il faut se rappeler que la figure résulte du développement d'une surface cylindrique sur laquelle les lignes MN, M'N' étaient en contact. Cette surface était animée d'un mouvement uniforme de rotation qui entraînait tous les points dans le sens de la flèche F.

Avant l'inflammation, le style du manomètre décrivait sur

le cylindre une section circulaire qui, en développement, est devenue la droite AL. Au moment de l'inflammation le style, qui était en A, a été immédiatement écarté de AL, et, la pression croissant sans cesse dans le cylindre, il a décrit sur le cylindre tournant la courbe développée AL. On peut aisément savoir quel est le temps qui s'est écoulé entre le moment où le style était en A et celui où il est arrivé en B par exemple. Traçons en effet à partir de B la courbe que décrirait le style pour passer de la position d'équilibre (correspondant à la pression intérieure *h*) et arriver en B, le cylindre étant supposé immobile. Cette courbe, qui est presque exactement un arc de cercle, vient rencontrer AL en *b*. Le cylindre a donc tourné de l'arc A*b* pendant le temps que le style a mis à aller de A en B. L'arc A*b* représente ainsi ce temps puisque la vitesse de rotation du cylindre est uniforme.

A partir du point B, la pression décroît dans le cylindre, le gaz se refroidit et le style se rapproche de la droite AL. Mais comme le ressort du manomètre a été lancé avec une certaine vitesse, il se met à vibrer, et le style marque ses vibrations comme le montre la figure. Ces vibrations s'atténuent assez rapidement et finissent par cesser complètement. A partir de ce moment, le style trace sur le cylindre une courbe qui va sans cesse en se rapprochant de AL, et que l'on obtiendrait en plaçant bout à bout les fragments AB, C'DC, D'E etc. Les spires de cette courbe se rapprochent de plus en plus, car le refroidissement du gaz qui remplit le cylindre est d'autant plus lent que sa température devient plus faible. Lorsque le refroidissement du gaz est complet, le style décrit une droite parallèle à AL, mais située un peu au-dessus de celle-ci parce que, dans l'expérience choisie pour exemple, la pression finale est supérieure à la pression initiale *h*.

En résumé la courbe de la *fig.* 9, Pl. XV, ou plutôt celle qui résulterait comme on l'a dit plus haut, de la mise bout à

bout des fragments de courbe inscrits sur la figure, a pour abcisses les temps, et pour ordonnées (en prenant les ordonnées courbes, telles que B*b*) les pressions qu'exerce à chaque instant le gaz qui remplit le cylindre, si l'on néglige l'accélération du style. La loi des variations que le temps amène dans la valeur de cette pression est donc exactement représentée par la courbe en question qui donne à chaque instant l'état du gaz dans le cylindre.

Or cet état du gaz se partage en deux périodes très distinctes :

1° La période pendant laquelle la pression croît, c'est-à-dire pendant laquelle l'inflammation se propage dans le cylindre; elle est représentée par la portion AB de la courbe;

2° La période pendant laquelle, le gaz, après avoir complètement brûlé, se refroidit avec une vitesse plus ou moins grande; elle est évidemment représentée par la portion de la courbe qui suit le point B.

Pendant la première période, il n'y a pas dans le cylindre seulement combustion, il y a encore, et simultanément refroidissement, comme nous le verrons plus tard. Pour l'interprétation des phénomènes qui se produisent pendant la première période, il faut donc connaître la loi suivant laquelle le gaz se refroidit.

Cette loi du refroidissement, l'étude de la seconde partie de la courbe permet de la connaître avec une très grande précision. Nous commencerons par cette étude qui a d'ailleurs en elle-même un grand intérêt comme nous le montrerons plus loin.

1° ÉTUDE DE LA PÉRIODE DE REFROIDISSEMENT NORMAL.

Procédé de mesure des ordonnées de la courbe de refroidissement. — La première chose à faire, pour

étudier la courbe correspondant à la période de refroidissement, est d'éliminer l'influence des vibrations, c'est-à-dire de déterminer la courbe que décrirait le style s'il ne vibrait pas, et si sa position à chaque instant correspondait à la tension du ressort qui fait équilibre à la pression du gaz dans le cylindre.

Supposons, pour résoudre la question plus aisément, que la ligne cherchée soit une droite AB (*fig.* 2, Pl. XII) autour de laquelle le style décrit une sorte de sinusoïde d'amplitude graduellement décroissante.

Si l'on prend AB pour axe des x, et la direction perpendiculaire pour axe des y, la courbe sinusoïde aura une certaine équation

$$y = f(x) \sin x$$

dans laquelle $f(x)$ représente la loi de variation de l'amplitude.

Pour tous les points correspondants à $x = (2n + 1)\frac{\pi}{2}$, on a

$$y = \pm f(x) \quad \text{et} \quad \frac{dy}{dx} = \pm f'(x).$$

La courbe $y = \pm f(x)$ se compose de deux branches ab, $a'b'$, placées symétriquement de part et d'autre de AB et qui viennent toucher la sinusoïde à ses sommets. Si nous supposons tracées ces deux courbes, et si, par l'un des points de tangence t avec la sinusoïde nous menons l'ordonnée qui vient rencontrer en t' l'autre branche, le point m où cette ordonnée vient rencontrer AB est le milieu de tt'.

Il suffira donc pour tracer AB, de mener les courbes ab, $a'b'$ déterminées par la condition qu'elles sont tangentes aux sommets de la sinusoïde; de mener les ordonnées de de tous les points de tangence en les prolongeant jusqu'à la branche de courbe symétrique, et de prendre les milieux

des droites ainsi déterminées. Les points ainsi obtenus sont des points de la droite AB.

En partant de ces principes, voici comment on étudie la courbe d'une expérience donnée. On mène deux courbes qui passent par les sommets maxima et minima des vibrations; puis on trace, au moyen d'un patron préparé avec soin, les ordonnées curvilignes correspondant aux sommets minima en les prolongeant jusqu'à la rencontre de la courbe qui passe par les sommets maxima. Les pieds de ces ordonnées doivent être équidistants, et la distance qui les sépare représente un temps égal à $0^{sec},0305$. Ce temps est pris pour unité. En portant sur la ligne AL, à partir du point pris pour origine, des longueurs égales à celle qui représente cette unité de temps, on détermine, dans la portion de la courbe dépourvue de vibrations, les pieds des ordonnées qui marquent des temps équidistants; les points correspondants de la courbe s'obtiennent aisément.

Le temps correspondant à la première ordonnée maxima est noté 0,5. Celui qui correspond à la première ordonnée minima est 1, et ainsi de suite.

On mesure alors, au moyen d'un double décimètre gradué en demi-millimètres les ordonnées des points de la courbe ainsi déterminés. L'abaque permet de transformer ces ordonnées en pressions. Les pressions ainsi obtenues représentent $\varpi - h$; ϖ étant la pression variable du gaz (en centimètres de mercure), h étant la pression initiale dans le cylindre.

Si l'on appelle ϖ_0 la pression qu'exerce le gaz après son complet refroidissement, en supposant qu'il ne se soit pas condensé; si l'on appelle τ la température *absolue* du gaz à chaque instant, τ_0 la température *absolue* après complet refroidissement, on a, en admettant que le gaz suit les lois de Mariotte et de Gay-Lussac,

$$\frac{\varpi}{\varpi_0} = \frac{\tau}{\tau_0}.$$

On déduit de cette formule

$$\varpi - \varpi_0 = \frac{\varpi_0}{\tau_0}(\tau - \tau_0).$$

Comme τ_0 est la température du cylindre, on voit qu'à chaque instant, *lorsqu'il n'y a ni dissociation ni condensation*, $\varpi - \varpi_0$ est proportionnel à $\tau - \tau_0$, c'est-à-dire à l'excès de la température du gaz sur celle du cylindre.

Si k est la diminution de pression que produit la combustion, les gaz étant pris à la température τ_0, on a

$$h - k = \varpi_0.$$

Dans les mélanges pour lesquels l'oxyde de carbone ou l'hydrogène est le gaz combustible, et *lorsqu'il n'y a pas de dissociation ou lorsque la recombinaison des éléments dissociés est achevée*, k est égal à la pression qu'exerce dans le mélange qui reste engagé dans la combinaison.

On a ainsi

$$\varpi - h + k = \varpi - \varpi_0.$$

Lorsqu'on a mesuré en centimètres de mercure, les ordonnées qui représentent $\varpi - h$, il suffit de leur ajouter le nombre constant k pour obtenir $\varpi - \varpi_0$.

Relevé de l'expérience (4 XI, 3). — Voici, comme exemple, le tableau des mesures effectuées sur l'expérience (4 XI, 3) représentée *fig.* 9, Pl. XV, et dans laquelle on a fait détoner un mélange de cyanogène et d'air devant brûler pour oxyde de carbone.

Expérience 4 XI, 3.

Gaz mélangés dans le cylindre.	C^2Az^2	$10^{cm},7$	63,2. Pression initiale h avant la combustion.
	Air.	$51^{cm},5$	
	Vap. hygrométrique. .	1,0	
			72,9. Pression finale après refroidissement.

Augmentation de pression théorique. 10,7

— — observée. 9,7

Ordonnées pendant la période de refroidissement.

NUMÉROS des ordonnées.	MESURES en décimillimètres.	ORDONNÉES en centimètres de mercure. $\varpi - h$.	$\varpi - h - 10$ ou $\varpi - \varpi_0 = y$.	$\frac{dy}{dt}$.	$1000 \frac{1}{y} \frac{dy}{dt}$.
0,5[1]	872-745[2]	625cm	615cm		
1	822-728	597	587	52	89
1,5	780-696	573	563	45	80
2	678-740	552	542	41,5	76
2,5	652-710	531	521	38	73
3	635-682	514	504	36	72
3,5	615-655	497	487	33,3	69
4	595-630	480	470	32,0	68
4,5	580-605	465	455	30,3	68
5	562-585	451	441	28,5	65
5,5	540-565	435	425	26,7	63
6	530-545	423	413	25,2	61
7	500-512	400	390	22,5	58
8	475-483	379	369	20,0	54
9	452-458	361	351	17,5	50
10	430-435	343	333	16	48
11	412-418	330	320	15	47
12	395	315	305	13,8	45
13	378	301	291	13	45
14	362	289	279	12	43
15	348	278	268	11	41
16	335	267	257	10,2	40
17	322	257	247	9,7	39
18	310	248	238	9	38
19	298	239	229	8,7	38
20	288	231	221	8,5	38,0
21	277	222	212	7,6	
26	237	191	181	5,9	32
31	202	163	153	4,5	29
36	181	146	136	3,4	25
41	160	129	119	3,0	25
46	144	116	106	2,5	23
51	128	104	94	2,1	22
56	117	95	85	1,65	19
61	107	87	77	1,5	19
66	98	80	70	1,3	18
71	90	74	64		

[1] L'ordonnée 0,5 est la première ordonnée correspondant à un maximum de la vibration; cette ordonnée n'est jamais connue qu'à peu près, parce que, pour l'obtenir, on est obligé de *prolonger* au sentiment la courbe tangente aux minima des vibrations.

[2] Ces deux nombres correspondent à chacune des deux courbes qui sont respectivement tangentes aux minima et aux maxima des vibrations.

Recherche d'une expression représentant la loi de la chute de pression. — Les nombres inscrits dans la quatrième colonne du tableau précédent sont proportionnels à l'excès de la température du gaz sur celle des parois de cylindre. Nous avons à chercher la loi de variation de ces nombres avec le temps t inscrit dans la première colonne. Cette loi est représentée par une certaine fonction

$$y=f(t).$$

Pour trouver l'expression de cette fonction, ou tout au moins une fonction qui ait sensiblement les mêmes valeurs entre les limites de l'expérience, nous pouvons former les valeurs de sa dérivée $\frac{dy}{dt}$. Nous emploierons à cet effet les formules connues. Si y', y'', y''' sont des valeurs de y correspondant à des temps équidistants et suffisamment rapprochés pour que la courbe puisse être assimilée dans cet intervalle à une parabole, $\frac{y'''-y'}{2}$ est la valeur de $\frac{dy}{dt}$ qui correspond à y''.

Les valeurs de $\frac{dy}{dt}$ sont inscrites dans la cinquième colonne du tableau. Pour les obtenir on a naturellement augmenté l'intervalle de temps qui sépare les valeurs équidistantes y', y'', y''' à mesure que la courbure de la courbe $y=f(t)$ diminue.

Le problème est ainsi ramené à trouver l'expression de la fonction

$$\frac{dy}{dt}=f'(t).$$

Cette fonction a une signification physique intéressante, car $\frac{dy}{dt}$ est proportionnel à chaque instant à la vitesse de décroissement de la pression. Lorsqu'il n'y a ni dissocia-

tion ni condensation, $\frac{dy}{dt}$ est aussi proportionnel à la vitesse de l'abaissement de température de la masse gazeuse, c'est-à-dire à la vitesse du refroidissement.

Dans ce dernier cas, la vitesse du refroidissement est à chaque instant provoquée et réglée par l'excès de la température du gaz sur celle de l'enceinte, excès qui est alors lui-même proportionnel à $y = \varpi - \varpi_0$.

Au lieu de chercher la loi qui lie $\frac{dy}{dt}$ au temps t, on peut chercher la loi qui lie $\frac{dy}{dt}$ à y, et l'on peut espérer rencontrer une formule plus simple, puisque $\frac{dy}{dt}$ et y ont l'un avec l'autre une relation de cause à effet.

Nous allons donc chercher une fonction équivalente, dans les limites de l'observation, à la fonction

$$\frac{dy}{dt} = \varphi(y).$$

Cette fonction connue, une intégration donnera d'ailleurs la relation qui existe entre y et t.

Pour étudier la forme de la fonction $\varphi(y)$, nous nous servirons d'un procédé qui peut être considéré comme général et s'appliquant à toutes les questions analogues. On développe $\varphi(y)$ suivant les puissances croissantes de y, en s'arrêtant au terme du deuxième ordre, et remarquant que le terme indépendant de y manque, puisqu'on a choisi la variable y de telle sorte qu'elle est en quelque sorte la cause du phénomène que représente $\frac{dy}{dt}$. Nous aurons ainsi

$$\frac{dy}{dt} = ay + by^2.$$

En divisant par y les deux membres de cette égalité, il

vient

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dt} = a + by.$$

Si donc nous calculons, ce qui est aisé puisque nous connaissons les valeurs de y et de $\frac{dy}{dt}$, les valeurs successives de $\frac{1}{y}\frac{dy}{dt}$, et si nous les prenons pour les ordonnées d'une ligne ayant les y pour abscisses, cette ligne sera une droite dans le cas où la fonction $\varphi(y)$ sera correctement représentée en bornant son développement au terme en y^2. Une construction graphique fera connaître très aisément si cette condition est remplie, et dans ce cas la même construction donnera les valeurs de a et de b.

La sixième colonne du tableau donne les valeurs de $\frac{1}{y}\frac{dy}{dt} \times 1000$. La *fig.* 3, Pl. XII, représente le tracé de l ligne $\frac{1}{y}\frac{dy}{dt}$, et montre que cette ligne est bien une droite, car les écarts, avec la droite, des points donnés par l'observation ne dépassent pas les erreurs inévitables des mesures des ordonnées. Ces ordonnées sont en effet mesurées au décimillimètre, et l'erreur possible est toujours de 1 à 2 unités.

Expression de la vitesse de refroidissement. — L'épure de la *fig.* 3, Pl. XII, montre que

$$a = 0{,}008 \qquad b = 0{,}000124,$$

de sorte que la fonction $\frac{dy}{dt}$ est représentée par la formule

$$\frac{dy}{dt} = 0{,}008y + 0{,}000124y^2. \qquad (1)$$

Cette expression est correcte entre des limites très éten

dues de y, soit entre 61,5 et 64 centimètres de mercure. Il est d'après cela vraisemblable qu'elle serait encore correcte au moins dans une certaine étendue au-dessus et au-dessous de ces limites.

On peut déduire de là l'expression de la vitesse de refroidissement de la masse gazeuse. Nous avons vu en effet que

$$y = \varpi - \varpi_0 = \frac{\varpi_0}{\tau_0}(\tau - \tau_0),$$

τ désignant la température absolue du gaz et τ_0 celle de l'enceinte qu'on peut supposer invariable, à cause de la grande masse du cylindre, de sa facile conductibilité et de la petite quantité de chaleur totale que contient la masse gazeuse. Si l'on représente par θ l'excès $\tau - \tau_0$, $\frac{d\theta}{dt}$ est la vitesse de refroidissement, et l'on a

$$y = \frac{\varpi_0}{\tau_0}\theta, \qquad \frac{dy}{dt} = \frac{\varpi_0}{\tau_0}\frac{d\theta}{dt}.$$

En remplaçant, dans l'expression de $\frac{dy}{dt}$, y et $\frac{dy}{dt}$ par ces valeurs, il vient

$$\frac{d\theta}{dt} = a\theta + b\frac{\varpi_0}{\tau_0}\theta^2.$$

Dans l'expression dont il s'agit, on a

$$\tau_0 = 283 + 12 = 285°, \qquad \varpi_0 = 72,9,$$

et en combinant ces valeurs avec (1), on obtient

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0,008\,\theta + 0,000\,0331\theta^2. \tag{2}$$

L'unité de temps employée est la durée d'une vibration du manomètre, qui est sensiblement égale, comme on l'a vu, à $0^s,0305$. C'est pour rappeler cette unité de temps particulière que nous mettons la lettre v en indice de $\frac{d\theta}{dt}$. On

prendra pour unité la seconde en divisant $\frac{dy}{dt}$ par 0^s,0305, ce qui donne

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_s = 0{,}264\,\theta + 0{,}00109\,\theta^2 = 0{,}266\,\theta\,(1 + 0{,}00408\,\theta). \quad (3)$$

Nous indiquons la nature de l'unité de temps en mettant s en indice de $\frac{d\theta}{dt}$. Cette formule représente correctement le refroidissement entre les excès de température correspondant aux valeurs de $\varpi - \varpi_0$ égales à 615^{cm} et 64^{cm}, soit entre 2400° et 274°. Elle s'appliquerait sans doute encore pour des températures notablement supérieures et pour des températures notablement inférieures, quoique, pour ces dernières, il soit difficile de le constater par notre procédé ; les mesures des ordonnées devenant trop incertaines pour des pressions aussi faibles.

Définition de la température du gaz. — Dans tout ce qui précède, nous avons parlé de la température du gaz qui remplit le cylindre sans spécifier ce qu'on devait entendre par cette expression. Nous appellerons ainsi une certaine température absolue τ qui, si elle était la même en tous les points de la masse gazeuse, rendrait compte de la pression ϖ observée, suivant l'équation

$$\frac{\varpi - \varpi_0}{\varpi_0} = \frac{\tau - \tau_0}{\tau_0}.$$

Il n'est pas certain que cette condition soit réalisée, c'est-à-dire que l'égalité de température règne à chaque instant dans toute la masse gazeuse ; sous ce rapport nous ne pouvons faire que des conjectures, car la répartition de la température, à un instant déterminé, dans une masse gazeuse dont la température varie incessamment, ne peut être expérimentalement constatée. Il n'y a rien

d'impossible à supposer que la masse gazeuse, soustraite dans l'intérieur du cylindre à toute cause accidentelle de mouvement, se comporte d'une manière assez analogue à celle d'un corps solide qui se refroidit par la surface, les courants engendrés par les différences de densité n'ayant alors qu'une faible importance. Nous verrons en effet plus loin que la propagation de l'inflammation dans la masse gazeuse, semble se faire assez régulièrement suivant une onde sphérique, sans que l'influence des courants paraisse nuire beaucoup à la régularité de la marche de cette onde, et cela même dans le cas où la propagation dure un temps fort notable, quelques dixièmes de seconde par exemple.

L'égalité rigoureuse de température en tous les points de la masse gazeuse n'est donc pas vraisemblable. Mais il est difficile de dire de quel ordre de grandeur peut être l'excès de la température de la masse gazeuse intérieure sur celle de la couche superficielle. On peut seulement faire remarquer qu'il y a dans le gaz, entre la température de la surface et celle de l'intérieur, une dépendance qui ne se rencontre pas dans un solide. En effet lorsque la couche superficielle se refroidit, elle diminue la pression de toute la masse, et cette dilatation qui se transmet à peu près instantanément jusqu'au centre, refroidit les couches inférieures bien avant que l'influence du refroidissement par conductibilité se soit exercée sur elles.

Si l'on ajoute à cette influence, qui tend à égaliser la température, celle des courants provoqués par le changement de densité, on peut considérer comme vraisemblable qu'il n'y a pas une différence très considérable entre la température de l'intérieur et de celle la surface de la masse gazeuse.

Quoi qu'il en soit, on peut se demander si la quantité de chaleur perdue à chaque instant par la masse gazeuse serait correctement obtenue en la calculant au moyen de la

vitesse de refroidissement déduite de la variation de pression, et il est aisé de voir qu'il en est bien ainsi.

Supposons, en effet, pour simplifier, que la masse du gaz soit sphérique, de telle sorte que les couches isothermes soient des sphères concentriques.

Appelons τ_p la température absolue fictive qu'on déduit de l'observation de la pression ϖ de la masse gazeuse. Appelons en outre τ' la température vraie de la surface, τ'' la température vraie du centre, τ la température d'un point quelconque, et V le volume de la masse totale exerçant la pression ϖ. On a

$$\frac{\varpi V}{\tau_p} = \int_{\tau'}^{\tau''} \frac{\varpi dv}{\tau}$$

ou

$$\frac{1}{\tau_p} = \frac{1}{V}\int_{\tau'}^{\tau''} \frac{dv}{\tau} \qquad (a)$$

dv étant le volume très petit qui possède la température τ.

Pour qu'une certaine température fictive τ_m appliquée à toute la masse gazeuse, rende compte de la quantité de chaleur réellement contenue dans cette masse, il faut et il suffit que l'on ait, c_0 étant la chaleur spécifique moyenne entre τ et τ_0,

$$c_0\varpi \int_{\tau'}^{\tau''} \frac{dv}{\tau}(\tau - \tau_0) = c_0\varpi \frac{V}{\tau_m}(\tau_m - \tau_0)$$

ou

$$\frac{1}{V}\left\{\int_{\tau'}^{\tau''} dv - \tau_0 \int_{\tau'}^{\tau''}\frac{dv}{\tau}\right\} = 1 - \frac{\tau_0}{\tau_m},$$

et, à cause de $\frac{1}{V}\int_{\tau'}^{\tau''} dv = 1$,

$$\frac{1}{\tau_m} = \frac{1}{V}\int_{\tau'}^{\tau''}\frac{dv}{d\tau}. \qquad (b)$$

La comparaison des deux égalités (a) et (b) montre que $\tau_m = \tau_p$, ce qui démontre le théorème énoncé.

Uniformité de la loi qui régit la vitesse de refroidissement. — L'examen de l'épure représentée *fig.* 3. Pl. XII a une autre utilité que celle de nous donner la loi de refroidissement de la masse gazeuse. Elle nous permet en effet d'affirmer qu'une même loi de refroidissement s'applique aux températures voisines de 2400°, et aux températures voisines de 200°. Or, pour ces dernières, on est assuré qu'il ne se produit dans la masse aucun phénomène autre que la variation de température causée par le refroidissement. Il en est donc de même pour toutes les températures comprises entre 200° et 2400°. Dans cet intervalle considérable de température, les propriétés physiques du gaz restent sensiblement les mêmes, et par conséquent aucun phénomène chimique ne vient altérer la nature de ses molécules. En d'autres termes, il ne se produit pas de dissociation sensible dans le mélange d'azote, d'oxyde de carbone et d'une très faible proportion d'acide carbonique, qu'a produit la combinaison du cyanogène avec l'oxygène de l'air. Dans les conditions de l'expérience et entre les limites précitées de température, l'oxyde de carbone ne subit donc pas de dissociation sensible, ou du moins les choses se passent de telle façon que cette dissociation, si elle se produit, n'influe pas sur la vitesse de refroidissement de la masse gazeuse.

Relevé de l'expérience (4 XI, 2). — Constatation de la dissociation. — Nous passerons maintenant au relevé complet d'une autre expérience faite sur la combustion du mélange tonnant d'oxyde de carbone et d'oxygène.

(41 XI, 2). CO et O. — *Mélange tonnant.*

$h = 73,2$ ϖ_0 { théorique. . . . 49,1 ; observé. . . . . 50,2 } $\tau_0 = 273 + 12$

TEMPS t en vibrations du manomètre.	$\varpi - \varpi_0 = y$ en centimètres de mercure.	$\frac{dy}{dt}$.	$1000 \frac{1}{y} \frac{dy}{dt}$.	TEMPS t en vibrations du manometre.	$\varpi - \varpi_0 = y$ en centimètres de mercure.	$\frac{dy}{dt}$.	$1000 \frac{1}{y} \frac{dy}{dt}$.
1	577	»	»	14	279	15,5	55,5
1,5	556	37	66,4	15	264	14,0	53,0
2	540	31,2	57,7	16	251	12,0	48,0
2,5	525	29,0	53,9	17	240	11,0	46,0
3	511	26,4	52,5	18	227	10,5	46,2
3,5	498	25,3	48,3	19	219	9,5	43,4
4	487	24,1	49,0				
4,5	474	23,4	50,1	24	177	6,8	38.2
5	463	23,3	49,5	29	149	4,8	32,0
5,5	452	22,9	50,9	34	129	3,6	27,9
6	440	23,1	52,4	39	113	2,9	25,6
6,5	429	23,0	54,7	44	100	2.4	24,0
7	417	22,8	56.7	49	89	1,95	22,0
7,5	405	22,5	55,1	54	81	1,7	21.0
8	394	21,8	54,5	59	74	1,4	18,9
8,5	384	21,7	56,0				
9	373	21,2	57,0				
9,5	362	21,2	58,0	64	66	1,25	19,0
10	352	21,2	60,2	69	61	1,12	14,9
				74	56	0,9	16,0
11	331	19	57,5	79	51	0,8	15,6
12	314	18	57,4	84	48	0,75	15,6
13	295	17,5	58,4	89	45	$0,6_5$	14,5

La *fig.* 4, Pl. XII, montre le tracé qu'on obtient en prenant pour abscisses les $\varpi - \varpi_0$ et pour ordonnées les $1000 \frac{1}{y} \frac{dy}{dt}$ du tableau précédent. On voit à première vue que la ligne jalonnée par les points déduits de l'observation est, dans la limite des erreurs de mesure, exactement droite depuis $\varpi - \varpi_0 = 0$ jusqu'à $\varpi - \varpi_0 = 315$ environ. Au-dessus de cette pression la ligne change, presque brusquement, de direction, tout en restant droite jusque

vers la pression 450 pour se courber ensuite en se relevant.

Il est manifeste que, si nous suivons la courbe en sens inverse et en partant des pressions les plus élevées, il se produit jusqu'à la pression 315 un mode de refroidissement particulier qui, au moins pendant toute la période qui s'étend depuis la pression 475 jusqu'à la pression 315, période pendant laquelle la ligne de la figure est une droite à coefficient angulaire faible mais négatif, est caractérisé par un ralentissement considérable dans la rapidité du refroidissement. La cause de ce ralentissement ne peut être un phénomène d'ordre physique; il est en effet d'ordre chimique et c'est la *dissociation*.

La dissociation très importante de l'acide carbonique aux températures élevées est en effet bien connue depuis les mémorables travaux de Henri Sainte-Claire-Deville. Elle ralentit naturellement le refroidissement puisque, pendant qu'elle dure, à une certaine quantité de chaleur perdue sous l'influence de la paroi, correspond une quantité de chaleur gagnée, moindre il est vrai, et due à la combinaison d'une fraction de l'oxyde de carbone et de l'oxygène dissociés.

Au-dessous de la pression 315, la loi du refroidissement reste invariable jusqu'aux pressions les plus basses que l'on puisse utilement mesurer. Pendant toute cette période, l'état physique du gaz reste donc le même, il n'y a pas de dissociation.

Après avoir montré, par un exemple, avec quelle netteté notre procédé d'expérimentation constate, suivant les cas, la présence ou l'absence de la dissociation, nous laisserons de côté ce dernier phénomène, que nous étudierons plus tard avec détail, et nous rechercherons quelle est la loi du refroidissement, ou, d'une manière plus générale, de la chute de pression, pour les différents mélanges gazeux soumis à l'expérience.

Refroidissement des gaz permanents.

Expression de la vitesse du refroidissement de l'acide carbonique. Influence de la densité du mélange gazeux. — L'expérience (4 XI, 2) nous donne la loi du refroidissement de l'acide carbonique pendant la période de non dissociation. Cette loi est représentée par la formule

$$\frac{dy}{dt} = 0,0055\, y + 0,000\,017\,8\, \theta^2;$$

ou, en transformant les pressions en températures

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0,0055\, \theta + 0,000\,0307\, \theta^2,$$

la durée de la vibration du manomètre étant prise pour unité. En prenant la seconde pour unité on a

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0,180\, \theta + 0,001\,01\, \theta^2.$$

Nous rangeons dans le tableau suivant les coefficients α et β de la formule

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = \alpha\theta + \beta\theta^2$$

tels qu'on les déduit d'un certain nombre de nos expériences faites avec des mélanges d'oxyde de carbone, et d'acide carbonique ; ils ne contenaient, après combustion, que de l'acide carbonique avec la légère quantité de vapeur d'eau qui sature le gaz à la température ordinaire. Nous avons rangé ces expériences suivant les valeurs croissantes de ϖ_0, c'est-à-dire suivant les valeurs croissantes de la densité que possède le mélange gazeux après la combustion.

NUMÉROS.	DATES.	ϖ_0	$10^3\alpha$	$10^6\beta$ observé.	$10^6\beta$ calculé.
1	5 XI, 1	13,3	6	92,0	92,5
2	13 VII, 2	28,3	6	47,7	47,5
3	4 XI, 2	49,1	5,5	30,7	30,5
4	30 VI, 2	52,0	5	28,5	29,2
5	13 VII, 3	52,3	5	29,0	29,1
6	1 VII, 2	55,5	5	31,0	»
7	9 V, 1	57,8	6	30,0	»
8	8 V, 2	60,0	5	29,6	»
9	1 VII, 1	61,5	4	29,6	»
10	8 V, 3	66,8	5	29,3	24,4

On voit, sur ce tableau, que le coefficient α paraît rester à peu près constant, se montrant ainsi presque indépendant de la pression ϖ_0. Ce coefficient est au reste assez mal déterminé; en raison de sa petitesse, il n'a en effet presque aucune influence sur la vitesse de refroidissement aux hautes températures, pour lesquelles seules notre procédé d'expérimentation présente des garanties suffisantes d'exactitude.

Quant au coefficient β, si l'on se borne d'abord à l'examen des expériences 1 à 5, dans lesquelles la pression ϖ_0 subit de fortes variations, depuis $13^{cm},3$ jusqu'à $52^{cm},3$, on voit avec netteté que β croît lorsque ϖ_0 décroît. Si l'on place les points de ces cinq expériences sur une ligne ayant β pour ordonnée et $\frac{1}{\varpi_0}$ pour abscisses, on voit que cette ligne est presque rigoureusement droite, en ayant un coefficient angulaire égal à $10^{-6}.1130$ et coupant l'axe des ordonnées au point $10^{-6}.7,5$. On a donc

$$10^6.\beta = 7,5 + \frac{1130}{\varpi_0},$$

ϖ_0 étant toujours exprimé en centimètres de mercure.

On a inscrit dans la dernière colonne du tableau, les va-

leurs de $10^6.\beta$ calculées avec cette formule, et l'on voit que l'identité avec les valeurs calculées est presque complète. Si nous examinons maintenant les expériences 6 à 10, pour lesquelles, il est vrai, la pression ne subit que des variations relativement faibles, de 55,5 à 66,8, on voit que les variations de β semblent ne plus suivre la même loi. La formule trouvée précédemment donnerait 24,4 pour l'expérience 10 avec la pression 66,8 tandis que l'observation donne 29,3.

Nos expériences ne s'étendent pas à des pressions suffisamment élevées pour que l'on puisse en déduire avec certitude que la loi de variation de la vitesse de refroidissement ne suit pas aux pressions élevées, la même loi qu'aux pressions basses, et les différences que nous observons sont à peine supérieures aux erreurs possibles d'observation. Le fait cependant doit être noté, car M. A. Witz (*) dans ses expériences sur le pouvoir refroidissant de l'air a constaté qu'au dessus d'une pression représentée par $79^{cm},2$ de mercure, le pouvoir refroidissant est presque indépendant de cette pression.

Quoiqu'il en soit, pour des valeurs de ϖ_0 qui ne dépassent pas 50 à 55 centim. de mercure, nos expériences donnent, pour la vitesse de refroidissement de l'acide carbonique

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 10^{-4}.5,5\,\theta + 10^{-6}\left(7,5 + \frac{1130}{\varpi_0}\right)\theta^2$$

en prenant pour unité de temps les vibrations de notre manomètre, et

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_s = 0,18\,\theta + \left(0,00021 + \frac{0,0394}{\varpi_0}\right)\theta^2$$

avec la seconde pour unité.

La vitesse $\frac{d\theta}{dt}$ est considérable aux températures élevées.

(*) *Ann. ch. et phys.* (5), XVIII, 1. 1879.

On a en effet avec $\varpi_0 = 76$

$$\text{à } 1000^\circ \qquad \left(\frac{d\theta}{dt}\right)_e = 908^\circ$$

$$\text{à } 2000^\circ \qquad \left(\frac{d\theta}{dt}\right)_e = 3272^\circ$$

Ainsi un gaz à 2.000° commence à se refroidir avec une vitesse de 3.272° à la seconde.

Il est intéressant de comparer cette formule avec celles qui ont été établies pour représenter la vitesse de refroidissement dans le voisinage des températures ordinaires.

M. Witz (*) qui a fait des observations sur la vitesse de réchauffement de l'air la représente, sous la pression moyenne de 84^{cm}, par la formule

$$v = 1{,}48\,(0{,}11\,\theta + 0{,}0019\,\theta^2)$$

θ étant l'excès de température de l'enceinte sur celle du gaz. Il a trouvé la vitesse de refroidissement plus grande que la vitesse de réchauffement dans le rapport de 1,17 à 1 environ. Enfin le rapport du coefficient de conductibilité de l'acide carbonique à celui de l'air est, d'après les plus récentes observations, de $\frac{40}{48} = \frac{1}{1{,}2}$. D'après ces données la vitesse du refroidissement de l'acide carbonique, sous la pression 84^{cm} et pour un excès de 40 serait

$$\frac{1{,}17}{1{,}2} \times 10{,}30 = 10{,}1.$$

Notre formule donnerait 11,36. Ces nombres sont très comparables entre eux; on les rapprocherait encore l'un de l'autre en abaissant légèrement notre coefficient α_e. Au lieu de prendre $\alpha_v = 0{,}00055$, si l'on prenait $\alpha_v = 0{,}005$ et par conséquent $\alpha_e = 0{,}164$ au lieu de 0,18, on trouverait pour la vi-

(*) *Ann. ch. et phys.* (5), XV, 433. 1878.

tesse de refroidissement dans les conditions précitées, 10,7. Nous avons déjà remarqué d'ailleurs que ce coefficient α était très mal déterminé par nos observations.

Comparaison de nos formules avec les données connues sur la conductibilité du gaz. — La vitesse de refroidissement d'un gaz chaud, sous l'influence des parois, est un phénomène si complexe qu'il est difficile de rattacher notre formule à des données simples relatives à la nature des gaz. Dans ce phénomène, en effet, intervient la conductibilité du gaz, les mouvements qui se produisent dans la masse, le rayonnement du gaz, etc. On peut toutefois remarquer que la vitesse du refroidissement étant connue, on aura la perte de chaleur pendant une seconde en multipliant cette vitesse par le poids de la masse gazeuse et par la chaleur spécifique vraie. Appelant c la chaleur spécifique vraie, à la température du gaz que nous supposerons égale à θ, ce qui revient à supposer la température des parois égale à 0°; appelant en outre p_0 le poids de l'unité de volume à 0° et 760^{mm}, on aura pour la quantité de chaleur perdue pendant une seconde

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{p_0 c \varpi_0}{273} \cdot \left(\frac{d\theta}{dt}\right) = \frac{p_0 c}{273}[(0,18\,\theta + 0,000\,21\,\theta^2)\varpi_0 + 0,0394\,\theta^2]$$

L'expression de $\frac{dQ}{dt}$ se compose donc d'une partie proportionnelle à ϖ_0 et d'un terme en θ^2 indépendant de ϖ_0. Ce dernier terme est d'ailleurs, aux hautes températures, le terme prépondérant, comme on peut le voir par les nombres suivants :

	$0,18\,\theta + 0,000\,21\,\theta^2$	$0,0394 . \theta^2$
1000°	29 640	39 400
2000°	91 200	157 600

Or on peut supposer que le refroidissement du gaz, aux

températures élevées que nous considérons principalement, provient de deux causes qui s'ajoutent, d'une part le refroidissement par conductibilité, d'autre part le rayonnement sur la paroi.

La perte de chaleur due au premier effet, qui doit être proportionnelle à l'excès de température θ et au coefficient de conductibilité k, peut être supposée égale à $k\theta$. Or, M. Winckelman (*) a montré que le coefficient de conductibilité k de l'acide carbonique est représenté par la formule

$$k = k_0(1 + \beta\theta)$$

k étant indépendant de la densité du gaz et β étant égal à 0,005 ou 0,006. La perte de chaleur du gaz due à la conductibilité serait donc représentée par

$$k_0\theta + k_0\beta\theta^2,$$

et serait indépendante de la pression ϖ_0.

Quant à la perte par rayonnement elle doit être proportionnelle à la masse qui rayonne, c'est-à-dire à ϖ_0.

La perte totale devrait donc être représentée par une somme de termes telle que

$$\varpi_0 f(\theta) + mk_0\theta + mk_0\beta\theta^2,$$

$f(\theta)$ étant la fonction qui représente le rayonnement du gaz en fonction de la température. La formule à laquelle nous sommes arrivés est

$$\varpi_0 f(\theta) + M\theta^2.$$

Il ne manque que le terme $mk_0\theta$ qui fait sentir surtout son influence aux basses températures et que nos expériences ont été sans doute impuissantes à séparer du terme $\varpi_0 f(\theta)$.

Vitesse du refroidissement des gaz parfaits. —

(*) *Pogg. Ann.* 157, p. 537. 1876.

Jusqu'ici nous avons considéré l'acide carbonique se refroidissant seul. Nous allons maintenant considérer le refroidissement de mélanges contenant des gaz parfaits, c'est-à-dire des gaz qui suivent presque rigoureusement, à la température ordinaire, les lois de Mariotte et de Gay-Lussac.

Pour soumettre à l'expérience le refroidissement de ces gaz, il suffit de brûler un mélange de cyanogène et d'air ou de cyanogène et d'oxygène.

Nous avons déjà donné avec détail l'expérience (4 XI, 3) faite en brûlant le cyanogène avec l'air, de manière à former de l'oxyde de carbone. Il se forme toujours, dans cette combustion, une petite quantité d'acide carbonique, mais cette quantité peut être négligée quant à ce qui regarde la loi de refroidissement, et l'on peut regarder le gaz qui se refroidit comme formé à peu près de 0,7 d'azote et 0,3 d'oxyde de carbone. Nous avons vu que la formule de refroidissement de ce mélange est, entre 0° et 2400°, pour la pression $\varpi_0 = 73,9$.

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0,008\,\theta + 0,000\,033\,\theta^2$$

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_e = 0,264\,\theta + 0,00\,109\,\theta^2.$$

En comparant ces formules à celles qui s'appliquent l'acide carbonique, on voit que les coefficients sont analogues, quoiqu'un peu plus grands pour les gaz permanents :

	α_v	β_v
Acide carbonique . . .	0,0055	0,000 029
Gaz parfait.	0,008	0,000 033

Le refroidissement est donc un peu plus rapide pour les gaz parfaits, ce qui est d'accord avec l'ordre de grandeur des coefficients de conductibilité.

L'*expérience* (7 XI, 1) a été faite avec un mélange de cyanogène et d'oxygène en proportions telles que la combus-

tion produise de l'oxyde de carbone. Les données en sont les suivantes :

Cy	9,7	$\tau_0 = 273 + 12$	$\varpi_0 = 30,1$
O.	9,7		
Vapeur. . .	1,0		
	20,4		

La combustion n'a pas seulement produit de l'oxyde de carbone, car, après refroidissement, ϖ_0 est égal à 32,4 au lieu de 30,1, qui serait la valeur théorique. Après avoir ajouté de l'air jusqu'à ce que le mélange avec le gaz brûlé soit à la pression atmosphérique égale à 76,7, le cylindre contient 42,2 de gaz brûlé et 57,8 d'air. On constate que 8 p. 100 de ce mélange est absorbé par la potasse. Le gaz brûlé contenait donc 18,9 p. 100 de gaz absorbable par la potasse.

La *fig.* 5, Pl. XII, représente pour cette expérience la ligne

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dt} = f(y)$$

y désignant toujours $\varpi - \varpi_0$. On voit que cette ligne présente une forme très différente de celle que nous avons rencontrée jusqu'ici ; elle n'est droite que depuis la température ordinaire jusqu'à la pression 212 qui correspond ici à 2000°. Au-dessus de cette température, la ligne se courbe d'une manière très apparente en présentant sa convexité vers l'axe des x.

Au-dessous de 2000°, la droite qui représente la loi de refroidissement se poursuivant régulièrement jusqu'à la température ordinaire, donne pour ce refroidissement la loi

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0,004\,\theta + 0,000\,088\,\theta^2$$

ou

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_s = 0,13\theta + 0,0029\theta^2.$$

Le refroidissement est ici devenu beaucoup plus rapide à cause de la faible densité du gaz. En combinant cette expression avec la précédente, on verrait que le coefficient β de l'expression de la vitesse de refroidissement devrait être représenté par

$$10^6.\beta_v = -10 + \frac{3200}{\varpi_0}.$$

Cette formule n'est d'ailleurs qu'approximative, car les expériences combinées entre elles ne sont pas entièrement comparables, l'une contenant principalement de l'azote et l'autre principalement de l'oxyde de carbone.

Nous reviendrons plus tard, pour en chercher la cause, sur l'anomalie que présente, au-dessus de 2000°, la loi du refroidissement de l'oxyde de carbone, mais il est fort important, pour la suite de nos calculs, de connaître une formule empirique qui représente correctement le refroidissement au-dessus de 2000°. On arriverait à trouver une semblable formule en ajoutant à la formule à deux termes, $\alpha\theta + \beta\theta^2$, un terme en θ^3, et au besoin même un terme en θ^4. Mais le nombre de coefficients à déterminer irait ainsi en augmentant. Il est préférable, sans augmenter le nombre des coefficients, de chercher à donner une autre forme à la fonction.

Nous avons été conduits, après de nombreux tâtonnements, à la formule relativement simple

$$\text{Log}\,\frac{1}{y}\,\frac{dy}{dt} = a + by,$$

qui représente encore une droite si l'on prend y pour abscisse et $\log \frac{1}{y}\frac{dy}{dy}$ pour ordonnée.

La *fig.* 6, Pl. XII, représente la figure que l'on obtient en appliquant cette construction à l'expérience (7 XI, 1). On voit que le refroidissement est correctement représenté par la formule pour toutes les pressions supérieures à 125,

c'est-à-dire pour toutes les températures supérieures à 1100°. Par contre, pour les températures inférieures, la formule s'éloigne considérablement de l'observation. La formule logarithmique n'a donc que la valeur d'une loi empirique qui nous permettra ultérieurement de trouver la pression développée par la combustion.

Vitesse de refroidissement des mélanges contenant de l'oxyde de carbone mélangé à l'acide carbonique. — Nous avons expérimenté sur des mélanges formés, après combustion, d'acide carbonique accompagné de l'un des trois gaz, oxygène, oxyde de carbone ou azote. Nous allons passer successivement en revue quelques-unes de nos expériences.

1° *Mélanges d'acide carbonique et d'oxyde de carbone.*

La *fig.* 1, Pl. XIII, montre la ligne qui représente

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dt}=f(y)$$

pour l'expérience (28 X, 2), dans laquelle le gaz soumis au refroidissement était composé de

0,253 CO^2
0,732 CO
0,015 vapeur.

La pression ϖ_0 était égale à 64,8 ; $\tau_0 = 273 + 11$.

On voit que la ligne est droite à partir de $\varpi - \varpi_0 = 0$ jusque vers une valeur de la pression $\varpi - \varpi_0$ égale à 250cm, correspondant à 1100°. Dans cette portion on a

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0{,}006\,\theta + 0{,}000\,037\,\theta^2$$

ou

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_s = 0{,}20\,\theta + 0{,}0012\,\theta^2.$$

Cela ne s'éloigne pas beaucoup de ce qu'on a trouvé pour le mélange d'oxyde de carbone et d'azote de l'expérience (4 XI, 3) qui a donné

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0{,}008\,\theta + 0{,}000\,033\,\theta^2.$$

Mais, au-dessus de 1100°, la ligne se courbe d'une manière très apparente, comme on l'a déjà remarqué pour le mélange formé par le cyanogène brûlant avec l'oxygène pour oxyde de carbone.

Nous retrouvons donc ici la même particularité que celle que nous avons rencontrée dans les expériences précédentes faites avec des mélanges renfermant de l'oxyde de carbone. Seulement le changement dans la loi du refroidissement commence pour des températures plus basses.

La *fig.* 2, Pl. XIII, représente la ligne

$$\frac{1}{y}\frac{dy}{dt} = f(y),$$

correspondant à l'*expérience* (28 X, 1), dans laquelle le gaz soumis au refroidissement contenait

0,557 CO^2
0,427 CO
0,016 vapeur d'eau.

On voit, dans la figure, que le refroidissement a présenté les mêmes périodes que dans l'expérience précédente, sauf que l'on constate une dissociation à partir des pressions les plus élevées jusqu'à la pression 360 environ, à laquelle commence la période de refroidissement accéléré à la pression 285, correspondant à la température 1420°; qui finit à partir de ce point jusqu'aux températures les plus basses, la ligne est une droite qui donne, pour la loi de refroidissement

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0{,}005\,\theta + 0{,}000\,034\,\theta^2$$

ou

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_s = 0{,}16\,\theta + 0{,}0011\,\theta^2.$$

Vitesse de refroidissement des mélanges contenant de l'oxygène mélangé à l'acide carbonique. — La *fig.* 3 Pl. XIII, représente la courbe $\frac{1}{y}\frac{dy}{dt}$ pour l'*expérience* (27 X, 2), dans laquelle $\varpi_0 = 65{,}1$; $\tau_0 = 273 + 12$, le mélange brûlé contenant

0,247 CO^2
0,738 O
0,015 vapeur.

On constate que la ligne est droite à partir de $\varpi - \varpi_0 = 0$, jusqu'à $\varpi - \varpi_0 = 310$ correspondant à la température de 1360°. Au-dessus, la ligne présente une courbure moins prononcée que celle que nous avons observée pour les mélanges contenant de l'oxyde de carbone, mais de même nature, c'est-à-dire accusant un accroissement dans la vitesse de refroidissement.

Un commencement de dissociation est à peine indiqué au-dessus de la pression 392 qui correspondrait à la température de 1710.

La partie rectiligne donne, pour la vitesse de refroidissement, la formule

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0{,}006\,\theta + 0{,}000\,032\,\theta^2$$

ou

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_s = 0{,}20\,\theta + 0{,}00105\,\theta^2$$

formules très semblables à celles que nous avons trouvées pour les autres mélanges.

Puisque nous observons ici, aux températures élevées, un changement dans la loi de refroidissement analogue à celui qui a été observé avec l'oxyde de carbone, nous en

conclurons que la même cause doit être invoquée dans les deux cas. Si le changement était attribué à une modification physique de l'oxyde de carbone, il faudrait attribuer à l'oxygène un changement physique analogue.

La *fig.* 4, Pl. XIII, se rapporte à *l'expérience* (1 VII, 7) dans laquelle le mélange se refroidissant était formé de

0,665 CO^2
0,314 O
0,021 vapeur.

On constate une période de dissociation de l'acide carbonique, suivie par une accélération assez faible du refroidissement qui dure jusqu'à la pression 210 correspondant à la température 1130° environ. Au-dessous la ligne est droite et donne, pour la vitesse de refroidissement, les formules

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = 0,006\,\theta + 0,000\,034\,\theta^2$$
$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right) = 0,20\,\theta + 0,0011\,\theta^2$$

presque identiques à celles obtenues avec l'expérience précédente.

Vitesse de refroidissement des mélanges contenant de l'azote mélangé à l'acide carbonique. — La *fig.* 5, Pl. XIII, se rapporte à l'expérience (26 X, 4) dans laquelle le gaz se refroidissant avait la composition suivante.

0,281 CO^2
0,667 Az
0,037 O
0,016 vapeur

$$\varpi_0 = 64\cdot 0, \qquad \tau_0 = 273 + 12.$$

On ne constate pas de dissociation et l'accélération du refroidissement aux températures élevées est à peine sen-

sible. La loi du refroidissement est représentée par

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0{,}006\,\theta + 0{,}000\,034\,\theta^2$$
$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_s = 0{,}20\,\theta + 0{,}0011\,\theta^2$$

Enfin la *fig.* 6, Pl. XIII, se rapporte à l'expérience (23 VI, 3) faite avec le mélange tonnant d'oxyde de carbone et d'air. Le gaz qui se refroidissait avait pour composition

$0{,}333\ CO^2$
$0{,}634\ Az$
$0{,}032$ vapeur

$$\varpi_0 = 65{,}4 \qquad \tau_0 = 273 + 18.$$

La courbe montre une dissociation très nette suivie d'une accélération de vitesse à peine sensible et d'une partie rectiligne qui conduit à la formule de refroidissement

$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_v = 0{,}009\,\theta + 0{,}000\,035\,\theta^2$$
$$\left(\frac{d\theta}{dt}\right)_s + 0{,}34\,\theta + 0{,}00114\,\theta^2$$

Chute de pression pour les gaz partiellement ou totalement condensables.

Les gaz qui se condensent par l'abaissement de température suivent naturellement, dans leur refroidissement, une loi différente de celle que suivent les gaz non condensables.

a. — Gaz complètement condensables.

Expression de la vitesse de la chute de pression. — Nous appelons toujours ϖ la pression variable du gaz

qui se refroidit, et ϖ_0 la pression qu'exercerait le gaz brûlé si on le ramenait, *à l'état gazeux, et sans condensation*, à la température initiale τ_0. Nous cherchons encore la loi des variations de la fonction $\frac{d\varpi}{dt}$; mais $\frac{d\varpi}{dt}$ ne représentera plus que la vitesse de la chute de pression ; il ne sera plus proportionnel à la vitesse de l'abaissement de température. On aurait en effet encore

$$\frac{\varpi - \varpi'_0}{\varpi'_0} = \frac{\tau - \tau_0}{\tau_0},$$

mais ϖ'_0 dans cette formule représenterait la pression qu'exercerait la masse du gaz qui existe encore dans le cylindre, lorsqu'elle est parvenue à la pression ϖ et à la température τ, si on la portait à τ_0 en la laissant à l'état gazeux. Or, cette pression ϖ'_0 est variable à chaque instant puisque, à cause de la condensation qui augmente sans cesse, la masse gazeuse va sans cesse en diminuant.

Quoiqu'il en soit la vitesse d'abaissement de la pression $\frac{d\varpi}{dt}$ est une fonction de la pression ϖ ; nous chercherons l'expression de la fonction

$$\frac{d\varpi}{dt} = f(\varpi - p_0)$$

dans laquelle p_0 représentera la pression que le gaz exerce réellement lorsqu'il est arrivé, dans les conditions de l'expérience, à la température τ_0. Lorsque le mélange gazeux ne contient que des gaz condensables, de la vapeur d'eau par exemple, p_0 est la pression de la vapeur qui sature l'enceinte à τ_0. Lorsqu'il y a en outre des gaz permanents, p_0 est égal à la somme de la pression de la vapeur qui sature l'enceinte à τ_0 et de celle des gaz permanents ramenés aussi à τ_0.

En prenant ainsi $\varpi - p_0$ pour variable, on satisfait à

cette condition que $\frac{d\varpi}{dt}$ soit égal à zéro lorsque la variable $\varpi - p_0$ a une valeur nulle.

Vapeur d'eau. — Si l'on emploie le procédé général dont nous avons fait usage par les gaz permanents, et si l'on forme les valeurs de $\frac{1}{\varpi - p_0} \frac{d\varpi}{dt}$, on constate que ces valeurs sont presque rigoureusement constantes. On peut donc poser, a étant une constante

$$\frac{1}{\varpi - p_0} \cdot \frac{d\varpi}{dt} = a$$

et par conséquent

$$\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0).$$

Si l'on trace une ligne ayant pour abscisses $\varpi - p_0$ et pour ordonnées $\frac{d\varpi}{dt}$, cette ligne sera une droite. On va voir en effet, que la loi se vérifie avec une assez grande rigueur.

Expérience (12 VII, 1).

H + O. . . . . = $71^{cm},1$
O en excès. . . . . 1,0 }
Vapeur de saturation. . 2,3 } $3,3 = p_0$ $\tau_0 = 273 + 24$ $\varpi_0 = 49,7$.

TEMPS en vibrations du manomètre. (1)	$\varpi - p_0$ (2)	$\frac{d\varpi}{dt}$ (4)	Log($\varpi - p_0$) (5)	DIFFÉRENCE. (6)	DIFFÉRENCE moyenne. (7)
1	506	»	2,704		
1,5	450	96	653	0,091	
2	410	87	613		
3	333	69	521	92	0,0902
4	272	57	435	86	
5	220	47	342	93	
6	179	36	253	89	
7	148	31	170	83	
8	116	25	065	105	
9	100	20	2,000	65	0,0830
10	80	15	1,903	97	
11	69	13	839	64	
12	55	11	740	99	
13	46	9	663	77	
14	38	7	580	83	0,0784
15	32	6	505	75	
16	28	5	447	58	
17	24	4	380	67	
18	20	3,5	301	79	
19	18	2,5	255	46	0,0602
20	16	»	204	51	
21	14	»	146	58	

La *fig.* 7, Pl. XIII, montre que la ligne qui représente $\frac{d\varpi}{dt}$ en fonction de $\varpi - p_0$, est presque exactement une

droite. Cette droite devrait passer par l'origine, puisque $\frac{d\varpi}{dt} = 0$ pour $\varpi - p_0 = 0$. En réalité elle vient rencontrer l'axe des x au point $\varpi - p_0 = 4^{cm}$. Cette différence est légère, puisqu'une pression de 4 centimètres n'est indiquée sur le graphique que par une distance de 4 à 5 dixièmes de millimètre. Elle n'est d'ailleurs pas explicable par quelque erreur dans la composition du gaz, puisque la chute finale de pression doit être théoriquement de 71 centimètres, et qu'on a observé une chute de $70^{cm},5$. La différence ne peut donc être due qu'à une légère variation dans la rapidité de la chute de pression aux basses et aux hautes températures.

On peut déceler cette variation, que le procédé graphique employé ne met pas suffisamment en évidence, en remarquant que si l'on a réellement la relation

$$\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0)$$

on aura

$$\frac{dt}{\varpi - p_0} = adt$$

et par une intégration très simple

$$\text{Log}(\varpi - p_0) = Mat + C$$

M étant la base des logarithmes népériens. Si donc on prend les valeurs de log $(\varpi - p_0)$ pour des intervalles de temps t égaux, la différence de deux logarithmes contigus doit être constante.

Les colonnes (5), (6) et (7) du tableau précédent montrent que log $(\varpi - p_0)$ ne satisfait pas avec une parfaite rigueur à la formule qui vient d'être écrite, puisque la différence de deux logarithmes consécutifs est en moyenne de

0,0902	de la vibration	1	à la vibration	6
0,0830	—	6	—	11
0,0784	—	11	—	16
0,0602	—	16	—	21.

La chute de pression dans l'unité de temps, après s'être maintenue à peu près constante, jusque vers la vibration 9 ou 10, c'est-à-dire jusqu'à ce que la pression se soit abaissée de 506 centimètres à 100 ou 80 centimètres, se ralentit ensuite d'une manière assez notable.

En résumé le coefficient a de la formule $\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0)$, au lieu d'être rigoureusement invariable comme semble le montrer la *fig.* 7, Pl. XIII, reste en effet presque constant et égal à $\frac{0,09}{M} = 0,21$ environ (l'unité de temps étant la vibration du manomètre), de $\varpi - p_0 = 506$ centimètres à $\varpi - p_0 = 100$ centimètres. Il décroît ensuite notablement à mesure que $\varpi - p_0$ s'abaisse. Pour les pressions élevées, qui seules nous intéressent dans ce travail, on peut donc poser, en prenant la seconde pour unité de temps

$$\left(\frac{d\varpi}{dt}\right)_s = 6,8\,(\varpi - p_0).$$

Cette formule ne s'applique que dans les conditions de l'expérience, c'est-à-dire lorsque la densité de la vapeur à l'origine de la condensation, est définie par la pression $\varpi_0 = 49,7$ qu'exercerait cette vapeur si on la refroidissait à τ_0 sans la condenser.

Si l'on remarque que p_0 est la tension de la vapeur saturant l'enceinte à la température τ_0 qui est celle de la paroi du cylindre pendant toute l'expérience, on peut interpréter cette formule en disant que la chute de pression est proportionnelle à l'excès de la tension de la vapeur sur celle qui détermine la condensation sur les parois. C'est cet excès qui est la cause du phénomène de condensation. Le phénomène est donc ici proportionnel à la cause qui le produit.

Il résulte d'ailleurs clairement de toute cette discussion, et de l'examen de la figure, cette conséquence des plus

importantes, c'est que la vapeur d'eau ne subit aucune modification physique entre les pressions de 506 et de 100 centimètres de mercure. Comme elle n'en subit certainement aucune au-dessous de cette dernière pression, on peut donc dire avec certitude que si une masse de vapeur d'eau, dont la densité au moment de la combustion qui lui a donné naissance est définie par la pression $\varpi = 49,7$, se dissocie au moment de la combustion, cette dissociation a complètement pris fin lorsque la pression est descendue, par le refroidisssement et la condensation sur les parois, à 506 centimètres.

Les autres expériences que nous avons faites sur la vapeur d'eau, la pression ϖ_0 restant à peu près la même, donnent des résultats analogues. C'est ainsi que l'expérience (29, VI, 4), dans laquelle $\varpi_0 = 50$ et $\tau_0 = 273 + 24$, donne toujours pour les pressions élevées,

$$a_v = \frac{0.089}{M} = 20,7.$$

L'expérience (2 XI, 1), dans laquelle $\varpi_0 = 48,9$ et $\tau_0 = 273 + 9$ a donné pour a_v un chiffre notablement plus grand, $a_v = 0,24$.

Influence de la densité de la vapeur. — Nous avons vu que la diminution de la densité abaisse considérablement la température à laquelle cesse la dissociation de l'acide carbonique. Il était donc très important d'expérimenter avec de la vapeur d'eau de faible densité, de manière à tâcher de rendre apparente la dissociation, s'il y en a une.

Tel a été le but des expériences suivantes, faites avec des mélanges tonnants d'hydrogène et d'oxygène.

Expérience (11 XI, 1).

$\varpi_0 = 25,1 \qquad \tau_0 = 273 + 13 \qquad p_0 = 1,1.$

La fonction $\frac{d\varpi}{dt} = f(\varpi - p_0)$, est encore représentée presque rigoureusement par une droite; on a donc encore sensiblement $\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0)$, mais le coefficient a est plus élevé, et l'on trouve

$$a_0 = 0,291$$
$$a_s = 9,5.$$

Aucune dissociation n'apparaît.

Une autre expérience (15 XI, 2), faite avec le même mélange et la même pression ϖ_0, a donné $a_0 = 0,312$.

Expérience (15 XI, 3).

$\varpi_0 = 14,8 \qquad \tau_0 = 273 + 13 \qquad p_0 = 1,1.$

Aucune dissociation ne se manifeste encore. La ligne est presque exactement une droite dont le coefficient angulaire est plus grand que celle de l'expérience précédente, et donne

$$a_0 = 0,47.$$

Ces expériences ne montrent donc aucune dissociation pour la vapeur d'eau, même lorsqu'on abaisse la densité de 1 à 1/4.

Elles montrent en outre que le coefficient a, qui représente le rapport, à $\varpi - p_0$, de la chute de pression par unité de temps, varie beaucoup avec ϖ_0, c'est-à-dire avec la densité de la vapeur, puisqu'on a

ϖ_0	a_0 observé.	a_0 calculé.
50	0,21	0,20
25,1	0,29	0,31
14,8	0,49	0,46

La variation de a_v avec ϖ_0 est représentée d'une manière passable par la formule

$$a_v = 0,09 + \frac{5,5}{\varpi_0}$$

qui donne les résultats calculés contenus dans la dernière colonne du tableau qui précède. En prenant la seconde pour unité de temps, on aurait

$$a_v = 2,95 + \frac{190}{\varpi_0}.$$

Acide chlorhydrique. — Lorsqu'on fait brûler un atome de chlore par un atome d'hydrogène, l'acide chlorhydrique gazeux formé se condense avec une grande rapidité en se dissolvant dans l'eau qui formait une nappe mince au fond de notre cylindre. On peut étudier la loi de cette condensation d'un genre spécial. Voici le résultat d'une expérience faite avec le mélange tonnant de chlore et d'hydrogène.

Expérience (23 XII, 1).

Mélange tonnant de Cl et H.

Pression initiale. $h = 43,4$ $\tau_0 = 273 + 8$

$p_0 = 3,4.$

On essaie d'abord la formule

$$\frac{d\varpi}{dt} = f(\varpi - p_0).$$

La *fig.* 8, Pl. XIII, montre la ligne que représente cette fonction. Cette ligne est loin d'être droite, comme dans le cas de la vapeur d'eau, et l'on en conclut que la loi de condensation, par dissolution, de l'acide chlorhydrique est très différente de celle qui convient à la condensation de la vapeur d'eau.

La ligne qui représente $\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}$ est également une courbe.

On recourt alors à la formule logarithmique que nous avons déjà employée

$$\text{Log} \frac{1}{\varpi - p_0} \frac{d\varpi}{dt} = f(\varpi - p_0).$$

La ligne de la *fig.* 9, Pl. XIII, qui représente cette fonction, est presque rigoureusement une droite. La loi de condensation de l'acide chlorhydrique est donc exprimée par la formule

$$\text{Log} \frac{1}{\varpi - p_0} \frac{d\varpi}{dt} = a + b(\varpi - p_0)$$

ou

$$\frac{d\varpi}{dt} = \frac{1}{a}(\varpi - p_0)\, e^{\frac{b}{M}(\varpi - p_0)}$$

ou encore

$$\frac{d\varpi}{dt} = \alpha(\varpi - p_0)\, e^{\beta(\varpi - p_0)}.$$

L'épure donne

$$b = 0{,}0014 \quad \text{d'où} \quad \beta = 0{,}0032$$
$$\alpha = 1{,}16.$$

La chute de pression est très rapide; elle l'est cependant beaucoup moins que celle que l'on observe dans le cas de la vapeur d'eau.

Aucune dissociation n'apparaît.

b. *Mélanges de gaz condensables et de gaz permanents.*

Nous n'avons plus à nous occuper que des mélanges gazeux qui sont en partie seulement condensables. Nous ne pouvons plus nous attendre ici à trouver des lois très simples pour représenter la chute de pression, car cette chute est déterminée par le concours de deux phénomènes très différents, à savoir le refroidissement du gaz permanent et la condensation du gaz condensable. Nous donne-

rons cependant les formules auxquelles nous sommes arrivés dans les différents cas, non seulement parce qu'elles nous seront utiles dans la suite, mais encore parce qu'elles peuvent être utiles dans certaines applications.

Mélanges formés par la vapeur d'eau avec de l'azote ou de l'oxygène. — Lorsqu'on mélange ensemble des gaz condensables et des gaz permanents, la chute de pression n'est pas représentée par la formule à deux termes

$$\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0) + b(\varpi - p_0)^2$$

qui convient à l'acide carbonique et aux gaz simples. On peut s'en convaincre en traçant pour divers mélanges la ligne représentative de la fonction $\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}$. Cette ligne est très loin d'être droite.

Lorsque les gaz ajoutés à la vapeur d'eau sont l'azote ou l'oxygène, on satisfait très bien aux observations au moyen de la formule déjà employée à diverses reprises

$$\text{Log}\left(\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}\right) = a + b(\varpi - p_0).$$

Nous ne donnerons qu'un exemple.

La *fig.* 1, Pl. XIV, s'applique au mélange $1^v(H^2 + O) + 2^vO$. La ligne courbe y représente $\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}$, et la ligne droite, $\log\left(\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}\right)$, en fonction de $\varpi - p_0$.

Le tableau suivant montre les valeurs de $\alpha = \frac{1}{a}$ et de $\beta = \frac{b}{M}$ que nous avons calculées pour un certain nombre de mélanges de vapeur d'eau et d'oxygène ou d'azote.

	H^2O	O	Az	ϖ_0	α	β
29 X, 7	1,04	1,50	»	61,1	0,21	0,0054
17 VII, 3	1,09	1,45	»	61	0,27	0,0050
29 X, 2	1,06	2,94	»	65	0,13	0,0073
19 VI, 1	1,10	0,33	3,07	68	0,19	0,0061
17 VI, 2	1,09	0,29	2,62	68	0,17	0,0068
24 X, 2	1,07	0,12	2,78	65	0,19	0,0058
26 X, 1	1,08	0,26	2,86	52,4	0,20	0,0077
26 X, 2	1,12	0,22	2,77	34,1	0,22	0,0124
26 X, 3	1,25	0,29	2,89	17,7	0,32	0,0230
17 VI, 4	1,10	0,41	3,14	68,5	0,19	0,0065
25 X, 2	1,12	0,83	5,02	68,3	0,18	0,0053
25 X, 6	1,12	1,10	5,98	68,8	0,31	0,0052

La loi des variations des coefficients α et β n'est pas aisée à démêler. Lorsque la pression ϖ_0 ne varie que dans de faibles limites le coefficient β varie peu. Lorsque ϖ_0 diminue beaucoup, sans que la composition du mélange subisse de fortes variations, le coefficient β subit une augmentation considérable, comme le montrent les expériences 26 X, 1, 2, 3 faites avec un mélange tenant, à l'origine du refroidissement, environ 3 de gaz permanents pour 1 de vapeur d'eau. On tirerait de ces 3 expériences

$$\beta_n = \frac{0,41}{\varpi_0}$$

qui donnerait

pour 26 X, 1 $\beta_0 = 0,0078$
26 X, 2 0,0012
26 X, 3 0,0023

Mélanges formés par la vapeur d'eau et l'hydrogène. — Les lois de la chute de pression ne restent pas les mêmes lorsqu'à l'oxygène ou l'azote on substitue un gaz beaucoup plus conducteur pour la chaleur, tel que l'hydrogène.

Dans ce cas, la loi de l'abaissement de la pression est de la même forme que celle que nous avons établie dans le cas de l'acide carbonique seul. On peut alors poser

$$\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0) + b(\varpi - p_0)^2,$$

et par conséquent $\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}$ en fonction de $\varpi - p_0$ représente une droite. C'est ce que montre la ligne de la *fig.* 2, Pl. XIV, s'appliquant à l'expérience (12 VII, 2) dans laquelle on avait les données suivantes :

Expérience (12 VII, 2)

H^2O 1,06 ; H 0,634 } $\varpi_0 = 55,8$ $\tau_0 = 273 + 24$

Les coefficients a et b qui se tirent de cette figure sont

$$a = 0,023 \qquad b = 0,000\,58$$

Lorsqu'on augmente la proportion d'hydrogène, le coefficient a diminue, mais le coefficient b augmente ; c'est ce qui résulte des nombres trouvés pour l'expérience suivante :

Expérience (29 X, 1)

H^2O 1,06 ; H 3,10 } $\varpi_0 = 65,2$ $\tau_0 = 273 + 12$

$$a = 0,006 \qquad b = 0,000\,74.$$

Lorsqu'on fait brûler des mélanges d'hydrogène et d'air avec excès d'hydrogène, c'est la loi des mélanges avec azote qui l'emporte. On peut s'en convaincre par l'examen de la *fig.* 3, Pl. XIV, qui montre la ligne représentative de $\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}$ en fonction de $\varpi - p_0$ pour l'expérience (24 X, 3) dans laquelle on avait

H^2O 1,07 ; Az 1,87 ; H 1,13 } $\varpi_0 = 65,2$ $\tau_0 = 273 + 12.$

Cette ligne est manifestement courbe, tandis que celle qui représente $\log \frac{1}{\varpi - p_0} \frac{d\varpi}{dt}$ en fonction de $\varpi - p_0$ est une droite, comme le montre la *fig.* 4, Pl. XIV.

Voici, pour les mélanges renfermant de l'hydrogène et de l'azote, les résultats que nous tirons de nos expériences :

DATES.	H^2O	Az.	H.	ϖ_0	α	β
24 X,3	1,07	1,87	1,13	65,2	0,29	0,0058
25 X,1	1.10	1,93	2,67	67,5	0,25	0,0062
24 X,6	1,10	1,88	3,42	67,7	0,29	0,0061
25 X,4	1,12	2,00	4,26	68,2	0,30	0,0055

On voit que les coefficients α et β varient assez peu avec la quantité d'hydrogène.

Notre formule empirique ne représente pas d'ailleurs le phénomène avec une parfaite rigueur, pas plus que la formule $\frac{1}{\varpi - \varpi_0} \frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - \varpi_0) + b(\varpi - \varpi_0)^2$ ne représentait rigoureusement, dans toute l'étendue de l'échelle des températures, le phénomène du refroidissement des mélanges formés d'acide carbonique et de gaz permanents. C'est ce que l'on constate aisément en examinant les figures qui représentent $\log \frac{1}{\varpi - p_0} \frac{d\varpi}{dt}$ en fonction de $\varpi - p_0$ pour des mélanges contenant une forte proportion de gaz permanents, c'est-à-dire supérieure à 2v pour 1v de vapeur. On constate que, pour de fortes pressions, la chute de pression est un peu plus rapide que ne l'exigerait la loi

$$\log \frac{1}{\varpi - p_0} \frac{d\varpi}{dt} = a + b(\varpi - p_0).$$

Mélanges formés par la vapeur d'eau et l'acide carbonique. — Nous avons aussi expérimenté sur les mélanges de vapeur d'eau et d'acide carbonique.

1° *Expérience* (27 X, 3)

Volumes égaux des mélanges tonnants $CO + O$ et $H^2 + O$.

$$\left.\begin{array}{ll} H^2O & 1,05 \\ CO & 1 \\ O & 0,08 \end{array}\right\} \quad \varpi_0 = 48,2 \qquad \tau_0 = 273 + 12.$$

La *fig.* 6, Pl. XIV, montre la ligne représentative de $\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}$ en fonction de $\varpi - p_0$. La dissociation de l'acide carbonique se montre très énergique jusqu'à la pression $\varpi - p_0 = 290^{cm}$ environ. Au-dessous, la chute de pression suit une loi de même forme que pour l'acide carbonique seul,

$$\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0) + b(\varpi - p_0)^2.$$

On a

$$a_v = 0,014 \qquad b_v = 0,00028$$

l'unité de temps étant la vibration du manomètre, soit

$$a_s = 0,46 \qquad b_s = 0,0092$$

avec la seconde pour unité.

Expérience (29 X, 6) (*fig.* 5, Pl. XIV)

$1^v (H^2 + O) + 0^v,71\ CO^2$

$$\left.\begin{array}{ll} 1^v,04 & H^2O \\ 1 & CO^2 \end{array}\right\} \quad \varpi_0 = 49,1 \qquad \tau_0 = 273 + 12.$$

Pas de dissociation manifestée à partir de la vibration 1 pour laquelle on a $\varpi - p_0 = 329^{cm}$. La chute de pression suit la loi représentée par la formule à deux termes, dont les coefficients sont

$$a_v = 0,004 \qquad b_v = 0,000\,50$$

Expérience (8 XII, 1)

$1^v (H^2 + O) + 2^v\ CO^2$

$$\left.\begin{array}{ll} 1^v,06 & H^2O \\ 3,14 & CO^2 \end{array}\right\} \quad \varpi_0 = 67,7 \qquad \tau_0 = 273 + 12.$$

Pas de dissociation indiquée. La chute de pression suit la formule à deux termes pour laquelle on a

$$a_v = 0{,}004 \qquad b_v = 0{,}000\,17$$

Mélanges formés par la combustion du grisou. — Les mélanges formés par la combustion du grisou doivent contenir de l'acide carbonique, de l'oxyde de carbone quelquefois, peut-être une certaine quantité d'hydrogène, enfin de l'azote en grand excès quand le gaz comburant est l'air.

Expérience (13 VII, 1)

Mélange tonnant de grisou et d'oxygène pour la combustion à l'état d'acide carbonique.

Composition du mélange avant la combustion.	CH^4	12,35	$\varpi_0 = 40{,}8$
	O	24,7	$\tau_0 = 273 + 21$
	CH^4 en excès	1,05	
	Vap.	2,3	

La contraction, après refroidissement, au lieu d'être de 24,7 est égale à 20,9. La combustion ne s'est donc pas produite entièrement pour acide carbonique.

La ligne (*fig* 7, Pl. XIV) qui représente $\frac{1}{\varpi - p_0}\frac{d\varpi}{dt}$ en fonction de $\varpi - p_0$ accuse, à la façon ordinaire, une dissociation de CO^2 qui ne cesse qu'à partir de $\varpi - p_0 = 225$. Au-dessous de cette pression, le refroidissement est correctement représenté par la formule à deux termes dans laquelle

$$a_v = 0{,}010, \qquad b_v = 0{,}00\,52$$

Expérience (11 VI, 2)

Mélange tonnant de grisou et d'air. $\begin{cases} \varpi_0 = 76 \\ \tau_0 = 273 + 15 \end{cases}$

Il n'y a pas de dissociation d'acide carbonique accusée; la vitesse de refroidissement est correctement représentée

par la formule

$$a_v = 0{,}04 \qquad b_v = 0{,}00218.$$

ÉTUDE DE LA DISSOCIATION.

Nous avons vu de quelle façon nos courbes de refroidissement permettent de constater l'existence d'une dissociation, et même de voir dans certains cas, jusqu'à quelle température elle fait sentir son effet. Nous allons résumer ici les données que nos observations nous ont permis de réunir sur cet important sujet.

a. *Dissociation de l'acide carbonique.*

Température à laquelle cesse la dissociation. — On peut connaître la température à laquelle cesse la dissociation au moyen des lignes représentant $\frac{1}{\varpi - \varpi_0} \frac{d\varpi}{dt}$. La partie de ces lignes qui correspond au refroidissement régulier est une ligne droite d'un certain coefficient angulaire; la partie qui correspond au refroidissement ralenti par la combinaison des gaz dissociés est une autre droite d'un coefficient angulaire très différent. L'intersection de ces deux droites donne le point où commence l'une des périodes et où finit l'autre. L'abscisse de ce point donne la valeur correspondante de $\varpi - \varpi_0$ et la formule

$$\frac{\varpi - \varpi_0}{\varpi_0} = \frac{\tau - \tau_0}{\tau_0}$$

donne $\tau - \tau_0$ très peu différent de la température θ cherchée. On a résumé dans le tableau suivant les données que par ce procédé nous avons pu tirer de nos expériences.

1° *Mélange tonnant* $CO + O$.

Dates.	ϖ_0	Température à laquelle cesse la dissociation.
30 VI, 2	52	1810°
4 XI, 2	49	1820°
13 VII, 2	28,3	1610
5 XI, 1	13,3	1160

2° *Mélanges* $2/3^v (CO + O) + m\,CO^2$.

Dates.	m	ϖ_0	Température de dissociation finissante.
13 VII, 3	0,09	52,3	1820°
9 VI, 1	0,31	57,8	1730
8 VI, 2	0,49	60	1760
1er VII, 3	0,96	60	> 1760

3° *Mélanges* $2/3 (CO + O) + mO$.

1er VII, 7	0,457	52,8	1520
27 X, 1	0,741	57	1550
1er VII, 6	1,76	59,5	> 1800
27 X, 2	2,98	65,1	> 1700

4° *Mélanges* $1^v CO^2 + mCO$.

28 X, 1	0,768	57,1	1760
1er VII, 5	0,915	56	1770
1er VII, 4	0,932	56	1770
28 X, 2	2,89	64,9	> 1700°

3° *Mélanges* $1^v CO^2 + m$ Az et O.

23 VI, 3	1,91	65,4	1560
26 X, 4	2,52	64,3	> 1800
28 X, 2	2,89	65	> 1700
14 VII, 2	4,24	73	1770° mélange de Cy et air brûlant pour CO^2.

La première chose qui frappe les yeux en examinant ce tableau, c'est la très notable influence qu'exerce la densité du gaz, mesurée par la pression ϖ_0. A mesure que la densité diminue, la température à laquelle cesse la dissociation va

en décroissant. Lorsque ϖ_0 est égal à 50^{cm}, cette température est égale à 1800° environ; la température descend à 1600° quand $\varpi_0 = 28^{cm},3$ et à 1200° quand $\varpi_0 = 13^{cm},3$.

Les expériences sont trop peu nombreuses pour qu'on puisse établir une relation mathématique entre ϖ_0 et la température de dissociation nulle, mais il semble résulter de ces trois nombres que le rapport de la décroissance de la température à celle de ϖ_0, d'abord faible aux environs de $\varpi_0 = 50^{cm}$, s'accélère beaucoup dans le voisinage de $\varpi_0 = 13.3$.

Quand on ajoute de l'oxygène à l'acide carbonique, la température de dissociation finissante diminue, tant que le volume de l'oxygène ne dépasse pas celui de l'acide carbonique. Lorsque le volume de l'oxygène est égal ou supérieur à celui de l'acide carbonique, cette température semble devenir égale, sinon supérieure, à celle qui se produit avec l'acide carbonique seul.

L'addition de l'oxyde de carbone à l'acide carbonique a beaucoup moins d'influence que celle de l'oxygène. On s'explique cette différence, car l'oxyde de carbone, qui est un des produits de la dissociation de l'acide carbonique, tend lui même à se dissocier en carbone et acide carbonique.

Au contraire l'addition de l'azote paraît tendre à abaisser la température de nulle dissociation d'une manière bien plus énergique que l'oxygène, puisqu'avec l'addition de $1^{v},91$ d'azote, cette température est abaissée à 1560°, tandis que l'addition de $1^{v},76$ d'oxygène ne produit aucun effet marqué. Cependant, avec l'oxygène comme avec l'azote, l'abaissement de la température de nulle dissociation devient nul ou insensible, lorsque le volume de l'azote devient grand, c'est-à-dire égal ou supérieur à $2^{v},50$.

Les expériences faites avec des mélanges d'acide carbonique et de vapeur d'eau, accusent une dissociation très marquée de l'acide carbonique lorsqu'il y a volumes égaux

des deux gaz. Mais on ne peut plus, dans ce cas, assigner la température à laquelle la dissociation cesse, car, la vapeur d'eau se condensant d'une manière continue pendant l'opération, il est impossible de connaître la température à laquelle correspond, à un moment donné, la pression du gaz intérieur.

Il est important de remarquer que les températures dont nous parlons ici, sont toujours les températures moyennes du gaz dans le cylindre, et nous avons dit plus haut que ces températures peuvent différer assez notablement des températures réelles dans les diverses parties de la masse. Vers la fin de la dissociation, la partie du gaz dissocié qui est en voie de recombinaison, est au centre de la masse et possède une température supérieure à la moyenne. Les chiffres que nous indiquons comme correspondant à la température de nulle dissociation ou de recombinaison complète sont donc en réalité trop faibles.

b. *Dissociation de l'oxyde de carbone.*

On admet que la dissociation de l'oxyde de carbone donne du carbonne et de l'acide carbonique, suivant l'équation



$$2CO = C + CO^2.$$

Si le carbone se condense à l'état de particules solides en suspension, il y a contraction de 4 vol. en 2. Si le carbone reste à l'état de vapeur il y a condensation de 4 vol. en 3[1].

D'ailleurs la quantité de chaleur Q produite par la décomposition de l'oxyde de carbone et la combustion de la moitié du carbone pour acide carbonique est

$$Q = -52 + 94 = -42.$$

La dissociation de l'oxyde de carbone *dégagerait* ainsi

une quantité considérable de chaleur, tandis que la dissociation de l'acide carbonique en *absorbe*. Inversement la recombinaison des éléments de l'oxyde de carbone absorberait de la chaleur, et par conséquent tendrait à refroidir le gaz. La vitesse de refroidissement que provoque cette recombinaison en serait donc augmentée, et c'est par une accélération de la vitesse de refroidissement que devrait se traduire, dans nos expériences, la dissociation de l'oxyde de carbone. Il est vrai que l'effet produit serait affaibli par l'expansion qui accompagne la recombinaison, et qui a, sur nos courbes, la même influence qu'une augmentation de température.

Nous avons déjà vu que les courbes de refroidissement des mélanges contenant de l'oxyde de carbone indiquent, pour les températures inférieures, une loi de refroidissement analogue à celle qui se manifeste avec les gaz simples et avec l'acide carbonique seul, tandis qu'aux températures élevées, la vitesse de refroidissement présente une accélération assez notable. Il serait naturel de penser que cette particularité indique la dissociation de l'oxyde de carbone et sa reconstitution sous l'influence du refroidissement. Toutefois plusieurs objections se présentent.

D'une part les produits gazeux qui proviennent de la combustion du cyanogène dans l'air pour CO, ne montrent pas cette accélération, bien que la partie extrême de nos courbes atteigne, dans ce cas, la température de 2000° environ.

D'autre part les gaz simples, azote et oxygène, présentent un phénomène analogue, mais beaucoup moins accusé, à celui que montre l'oxyde de carbone. Or il est difficile d'imaginer, pour ces gaz, un mode de dissociation dont la nature soit telle que la recombinaison *absorbe* de la chaleur. La transformation de l'oxygène en ozone, à laquelle on pourrait songer et dont la formation a même été constatée dans l'acte de la combustion, absorbe de la chaleur et par

conséquent la recombinaison de l'oxygène en dégage.

L'accélération constatée pour les gaz simples et l'oxyde de carbone ne paraît donc pas tenir à un changement d'état physique. Elle doit sans doute être attribuée simplement à ce que la loi de refroidissement admise ne s'applique plus à des températures suffisamment élevées. Il suffirait en effet, pour rendre compte des faits, d'ajouter un terme en θ^2 à la formule

$$\frac{d\theta}{dt} = a\theta + b\theta^2.$$

Il faut d'ailleurs remarquer qu'on est loin d'être fixé sur les circonstances qui accompagnent la dissociation de l'oxyde de carbone. Nous avons supposé que le phénomène donnait lieu à du carbone solide, mais il serait peut-être plus rationnel d'admettre que le carbone reste, au moins dans l'intérieur de la masse, à l'état de vapeur. Dans ce cas, il y aurait une contraction de 4 vol. en 3 vol.

D'autre part M. Berthelot pense que la dissociation de C^2O^2 en $C + CO^2$ peut n'être accompagnée d'aucune variation calorifique ou seulement d'une variation faible, lorsque le carbone reste à l'état gazeux. On observe en effet que Fe^3O^4 et Fe^2O^3 par exemple absorbent, pour leur formation à partir du fer, une quantité de chaleur à peu près égale.

S'il en était ainsi, il est clair que nos courbes de refroidissement pourraient ne pas indiquer le phénomène de la dissociation, même s'il avait lieu, puisque celui-ci pourrait ne produire aucune influence sensible sur la chute de pression.

c. *Dissociation de la vapeur d'eau.*

Ni avec le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène, ni avec les mélanges très nombreux formés par ce mélange

tonnant additionné d'oxygène, d'hydrogène ou d'azote, nous n'avons pu constater aucun phénomène qui puisse faire soupçonner une dissociation quelconque de la vapeur d'eau.

Pour le mélange tonnant, la loi de la condensation est très simple ; or elle se poursuit exactement jusqu'à la première vibration, au delà de laquelle nous ne pouvons plus la suivre. Il est vrai que la variation de pression qui se produit entre le moment de la pression maxima et celui du minimum de la vibration 1, (la première pression que nous puissions mesurer), est assez grande; pour l'expérience (12 VII, I) par exemple, la vibration 1 correspond à une pression égale à 509, tandis que la pression maxima développée par la combustion est égale à 833. La dissociation pourrait évidemment se placer entre ces deux pressions 509 et 633.

Mais on peut exagérer la dissociation, si elle existe, et la faire commencer à des températures ou des pressions plus basses, en diminuant la densité. Nous avons vu avec quelle netteté se manifeste cette influence lorsqu'il s'agit de l'acide carbonique. Or le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène, même en réduisant sa densité au quart (Exp. 15 XI, 3), ne montre encore aucune dissociation. Nous admettons donc que la dissociation de la vapeur d'eau est négligeable encore à la température de combustion du mélange tonnant. Ceci n'est d'ailleurs démontré que dans les conditions de nos expériences.

d. *Dissociation de l'acide chlorhydrique.*

L'acide chlorhydrique pur, préparé par la combustion du mélange tonnant, ne montre, dans la marche très rapide de sa condensation, aucune apparence de dissociation, ainsi qu'on peut le voir par l'examen des courbes *fig.* 8 et 9, Pl. XIII. Toutefois, on ne peut pas affirmer que

la dissociation n'existe pas, car entre le commencement de la combustion et le premier point que nous pouvons mesurer, la pression ϖ passe de 398^{cm} à 283^{cm}, perdant ainsi près du tiers de sa valeur. Dans cet intervalle, la dissociation peut se produire et prendre fin.

Pour essayer de décider la question, nous avons formé des mélanges dans lesquels la dissociation, si elle existe, doit persister jusqu'à des températures plus basses. Tels sont les mélanges contenant un excès d'hydrogène.

Mais aucun des mélanges que nous avons formés en ajoutant des quantités constantes d'hydrogène au mélange tonnant n'a montré aucune trace de dissociation.

Nous n'en conclurons pas cependant que la dissociation de l'acide chlorhydrique est nulle à la température de combustion, mais simplement qu'elle prend fin, si elle se manifeste, avant le moment où nous pouvons mesurer la pression intérieure. Nous verrons plus loin que l'étude des chaleurs spécifiques conduit à admettre en réalité une dissociation notable de ce gaz.

2° ÉTUDE DE LA PÉRIODE DE LA PROPAGATION.

Divers cas que présente la propagation de l'inflammation dans le cylindre. — Nous avons maintenant à aborder l'étude de la période pendant laquelle la combustion se propage dans le cylindre, ou plutôt l'étude de la portion de nos courbes de refroidissement qui précède le premier point pour lequel la mesure de la pression est possible.

Un premier et rapide examen suffit à montrer qu'il faut distinguer deux cas extrêmes.

Le premier est celui où la combustion se propage avec une extrême rapidité et où la propagation a pris fin au

bout d'un temps court relativement à la durée d'une vibration manométrique. Dans ce cas, la courbe tracée par le style se détache presque subitement de la génératrice du cylindre que parcourait le style avant la combustion. (V. *fig.* 5, Pl. XV). Quelquefois même, comme dans le cas des mélanges d'hydrogène et d'oxygène, ou de chlore et d'acide chlorhydrique, l'aiguille du style, choquée brusquement et avec une extrême énergie à sa base, c'est-à-dire en dehors du centre de percussion, se courbe autour de ce centre de sorte que le style est projeté du côté des pressions descendantes, et fait une sorte de crochet avant de reprendre sa marche normale. C'est ce que montrent la *fig.* 6, Pl. XV, qui se rapporte à la combustion du mélange tonnant de H et O sous une pression initiale égale à $72^{cm},8$ (2 XI, 1), et la *fig.* 7, Pl. XV qui se rapporte à la combustion du même mélange tonnant sous une pression initiale égale à $37^{cm},5$ (11 XI, 1).

Le second cas est celui où la propagation marche avec une assez grande lenteur pour que la pression *maxima* ne soit établie qu'au bout d'un temps qui comprend une ou même plusieurs vibrations manométriques. La *fig.* 9, Pl. XV, relative au cyanogène brûlant dans l'air pour CO en est un exemple. La propagation dure, dans cette expérience, un temps égal à 3 vibrations environ soit $0^s,09$.

Mais on peut avoir des durées de propagation bien plus longues encore. Tel est, par exemple, le cas de la combustion du mélange $1^v (CO + O) + 1^v,33\ CO^2$ (Exp. 1 VII, 1), auquel se rapporte la *fig.* 8, Pl. XV.

Durée de la propagation de l'inflammation dans le cylindre.

Ce dernier cas se prête aisément à l'étude du mode de propagation de la flamme.

On peut d'abord chercher quelle est la vitesse de propagation, c'est-à-dire quel est le temps employé par la flamme à aller du centre du cylindre jusqu'à la courbe d'intersection du fond plat avec les parois cylindriques. Notre cylindre ayant une hauteur et un diamètre de 0,17, la distance à parcourir par la flamme est de $0^m,12$. Le temps mis par la flamme à accomplir ce trajet est aisé à obtenir, car il est celui qui s'écoule entre le commencement de l'inflammation et le moment où la pression *maxima* est obtenue. Ces deux points se marquent très nettement sur nos courbes. L'un est le point où la courbe du style se détache de la génératrice qui correspond à sa position initiale; l'autre est le point que marque d'ordinaire l'élongation *maxima* de la première vibration; c'est celui que nous avons presque toujours noté 0,5.

En mesurant sur nos courbes la distance qui sépare ces deux points, nous avons pu former les tableaux suivants :

1° *Mélanges formés avec le grisou.*

NUMÉROS.	DATES.	QUANTITÉ de grisou pour 1 vol. d'air.	PRESSION initiale h	DURÉE totale de la propagation D_p	DURÉE de la propagation sans refroidissement D_s
2	11 VI, 4	0,073	76	5,60	3,30
3	11 VI, 3	0,087	76	4,04	1,99
4	11 VI, 9	0,101	76	1,96	0,98
5	2 VII, 3	0,105	74,4	1,83	0,73
6	11 III, 1	0,109	76	1,48	0,64
7	11 VI, 2	0,111	76	1,85	0,55
8	11 VI, 8	0,119	76	2,02	1,02
9	11 VI, 5	0,126	76	2,45	1,66
10	11 VI, 6	0,143	76	4,22	2,02

La *fig.* 1, Pl. XV, montre la loi qui lie la *durée* de propagation à la proportion de grisou. Le minimum de la durée correspond à la proportion de 0,098 de grisou, soit

presque exactement à la proportion pour laquelle l'air contient assez d'oxygène pour brûler le grisou en air et acide carbonique.

De part et d'autre de ce point, la durée de prorogation varie à peu près proportionnellement à la proportion de grisou.

Si l'on compare les résultats très concordants donnés par le tableau et reproduits graphiquement par les courbes avec ceux des expériences faites sur la propagation à l'air libre et mentionnées dans notre second mémoire, on voit qu'ils diffèrent beaucoup entre eux.

D'abord la vitesse de propagation dans notre cylindre est beaucoup plus considérable puisque, pour 0,08 de grisou, la vitesse est de 0,94 environ dans le cylindre, andis que nous avons trouvé 0,23 seulement à l'air libre.

Pour une proportion de 0,098 on a une vitesse de 2,65 dans le cylindre, de 0,20 à l'air libre.

En outre, le maximum de vitesse qui correspond à l'air libre à une proportion de 0,12 de grisou, correspond dans le cylindre à une proportion de 0,098, qui est très voisine de la proportion théorique. Ces différences s'expliquent sans doute par les conditions très différentes dans lesquelles s'effectue la propagation. A l'air libre, la flamme rencontre toujours le mélange non enflammé à la même pression, tandis que dans le cylindre, le gaz va en se comprimant à mesure que la flamme avance dans sa marche. Nous verrons d'ailleurs tout à l'heure que la vitesse de propagation ne reste pas, dans le cylindre, identique à elle-même depuis le commencement jusqu'à la fin de la propagation. Les nombres inscrits dans notre tableau sont donc comparables entre eux, mais ils ne seraient plus les mêmes si la grandeur du cylindre, et peut-être aussi sa forme, venait à varier.

2° *Mélanges* $CO + O + pCO^2$.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUME de CO^2 ajouté à 1 vol. $(CO + O)$	PRESSION initiale h	DURÉE totale de la propagation D_p (1)
1	8 V, 2	0,49	77,1	1,30
2	6 V, 1	0,91	75,9	4,12
3	1 VII, 3	0,96	72,0	4,36
4	27 VI, 6	0,96	74,0	3,94
5	1 VII, 2	1,13	65,5	4,61
6	8 V, 1	1,17	40,2	2,55
7	1 VII, 1	1,40	71,5	7,75
8	8 V, 3	1,49	77,1	12,00

(1) L'unité de temps est la durée de la vibration du manomètre qui est égale à 0s,0305.

La *fig.* 3, Pl. XV, montre la loi de variation de la durée de propagation avec la proportion de CO^2 ajouté au mélange tonnant.

L'expérience du (8 V, 1) semble montrer que la vitesse de propagation croît lorsque la densité du mélange gazeux décroît. Les expériences ne sont pas assez nombreuses pour montrer la loi de cet accroissement. D'après notre unique observation, la variation serait presque en raison inverse de la densité.

3° CO + O *et gaz parfaits.*

N°s	DATES.	GAZ AJOUTÉS A 1v (CO+O). Total des gaz ajoutés.	CO	C	Az	PRESSION initiale. h.	DURÉE totale de la propagation. D_p	DURÉE de la propagation sans refroidissement. D_s (1)
1	1 VII, 7	0,305		0,305		70,3		0s,16
2	27 X, 1	0,492		0,492		73,1		0 ,32
3	28 X, 1	0,512	0,512			73,1		0 ,22
4	1 VII, 5	0,565	0,565			70,6		0 ,18
5	1 VII, 4	0,635	0,635			70,0		0 ,18
6	1 VII, 6	1,17		1,17		70,0		0 ,53
7	23 VI, 3	1,27			1,27	76,4	1,03	0 ,62
8	26 X, 4	1,67		0,09	1,58	73,1	2,10	1 ,26
9	28 X, 2	1,93	1,93			73,0	1,10	0 ,66
10	27 X, 2	1,99		1,99		73,1	4,2	2 ,2
11	26 X, 2	2,01		0,15	1,86	73,1	4,14	2 ,08
12	26 X, 1	2,04		0,38	1,66	73,2	4,60	2 ,10
13	23 VI, 2	2,67		0,29	2,38	76,4	7,5	4 ,1

(1) Les valeurs de D_s sont déduites d'un procédé de mesure dont le principe sera exposé plus loin.

Ce tableau montre :

1° Que l'influence de l'azote et de l'oxygène sur la facilité de propagation est à peu près la même, malgré la diversité d'action chimique que pourraient exercer ces deux éléments. Nous avons vu qu'au point de vue de la dissociation, ces deux éléments exerçaient aussi des actions presque identiques.

2° Que, par contre, l'influence de l'oxyde de carbone est très dissemblable à celle des deux autres gaz. Ce gaz retarde beaucoup moins la propagation, comme il résulte de la comparaison des nombres suivants.

(28 X, 2)	CO + O + 3CO	vit. moy. de propagation	3,75
(27 X, 2)	$CO + O + 3O^2$	—	0,94
(26 X, 2)	$CO + O + 3Az^2$	—	0,95

Si l'on compare ces nombres à ceux du précédent tableau, on voit en outre que l'acide carbonique retarde la propagation bien plus encore que ne le font les gaz simples O et Az, car on a

(1er VII, 2) 1^v (CO + O) + 1^v,13 CO^2 vit. moy. de propagation 0,85
(1er VII, 7) 1^v (CO + O) + 1^v,17 O — 2,8

Cette différence considérable ne paraît pas tenir à la différence de conductibilité pour la chaleur qui est seulement un peu moindre pour l'acide carbonique. Il est vraisemblable qu'elle tient à la différence des chaleurs spécifiques qui, aux hautes températures, comme cela résulte de nos expériences, est près de deux fois plus grande pour l'acide carbonique que pour les gaz parfaits.

4° Mélanges formés avec le cyanogène.

Nos	DATES.	COMPOSITION rapportée à 1^v de C^2Az^2	PRESSION initiale. h	DURÉE totale de la propagation D_p	DURÉE de la propagation sans refroidissement. D_s	
1	7 XII, 1	O 1^v,00	20,1	0	0	Combustion avec O pour CO.
2	14 VII, 2	O 1 ,95 Az 7 ,33	73,1	2,50	1,28	Combustion avec l'air pour CO^2.
3	4 XI, 3	O 1 ,01 Az 3 ,80	63,2	2,75	1,55	Combustion avec l'air pour CO.
4	14 VII, 1	O 1 ,08 Az 3 ,68	68,5	2,80	1,56	(idem)

5° Mélange formé avec le sulfure de carbone.

Nos	DATES.	COMPOSITION	PRESSION	D_p	D_s	
1	14 VII, 3	CS^2 1 Air hum. 1,46	70,1	1,3		

La vitesse de propagation des mélanges tonnants du cyanogène avec l'air, soit qu'ils brûlent pour CO, soit qu'ils

brûlent pour CO^2, est peu différente. Les températures de combustion sont en effet presque les mêmes, 2.500° dans un cas, 2.600° dans l'autre. (V. plus bas.)

6° Mélanges formés avec l'hydrogène (*fig.* 4, Pl. XV).

NUMÉROS.	DATES.	QUANTITÉ de gaz ajoutée à 1 vol. (CO + O)	h	DURÉE totale de la propagation D_p	DURÉE de la propagation sans refroidissement D_s
		1° Mélanges avec Az *et* O.			
1	29 XI, 7	0,99	73,1	0	0
2	29 X, 2	2,00	73,0	»	0,08
3	18 VI, 2	1,94	75,7	»	0,30
4	24 X, 2	2,00	73,2	»	0,15
5	26 X, 1	2,10	58,6	»	0,17
6	26 X, 2	2,07	38,4	»	0,18
7	26 X, 3	2,05	19,7	»	0,36
8	19 VI, 1	2,27	75,6	»	0,27
9	17 VI, 4	2,37	76,0	»	0,24
10	25 X, 4	3,00	72,8	»	0,39
11	24 X, 7	3,36	73,0	»	0,64
12	25 X, 3	3,90	73,2	1,05	0,63
13	25 X, 6	4,71	73,0	2,94	1,77
		2° Mélanges avec H *en excès.*			
14	24 X, 3	2v { H 0,75 ; Az 1,25 }	73,2	0	0
15	25 X, 1	3,04 { H 1,76 ; Az 1,28 }	73,2	»	0,14
16	24 X, 6	3,53 { H 2,28 ; Az 1,25 }	73,1	»	0,18
17	25 X, 4	4,17 { H 2,84 ; Az 1,33 }	73,3	»	0,30
		3° Mélanges avec CO^2.			
18	29 X, 6	0,67	61	»	0,09
19	2 XI, 2	1,52	72,8	1,10	0,66
20	8 XII, 1	2,07	76,0	3,97	1,79

On voit la grande différence qui existe entre la vitesse de propagation des mélanges formés par CO et O et celle

des mélanges contenant H et O. Cette différence, d'ailleurs bien connue, ressortait déjà de nos expériences sur la vitesse de propagation dans un tube.

La grande conductibilité de l'hydrogène s'accuse par la grande rapidité qu'elle imprime à la propagation dans les mélanges où ce gaz intervient.

Les expériences 4, 5, 6 et 7 corroborent le fait, signalé précédemment, de l'augmentation de vitesse de propagation, toutes choses égales, avec la diminution de densité.

7° *Mélanges formés avec le gaz d'éclairage* (*fig.* 2, Pl. XV).

NUMÉROS.	DATES.	QUANTITÉ DE GAZ pour 1 vol. d'air humide.	DURÉE TOTALE de la propagation. D_p
1	10 III, 7	0,105	1,90
2	10 III, 6	0,108	1,80
3	9 VI, 1	0,170	1,50
4	8 III, 1	0,170	1,30
5	9 VI, 2	0,197	1,70
6	9 III, 10	0,210	1,05

Le maximum de la vitesse de propagation est obtenu pour le mélange contenant 0^v,17 de gaz pour 1^v d'air; c'est le résultat que nous avions trouvé par un autre procédé. (V. le second mémoire, p. 326.)

Mode de propagation de l'inflammation dans le cylindre.

Nous pouvons maintenant aller plus loin et examiner quelle est la loi que suit la propagation de l'inflammation dans notre cylindre.

Pour cela nous avons mesuré, à des intervalles équidistants suffisamment rapprochés, les ordonnées de la courbe qui correspond à la période de propagation.

Ces ordonnées ne représentent pas la pression qu

s'exerce, à l'instant correspondant, dans l'intérieur du cylindre. Il faut en effet tenir compte de l'accélération du style très importante pendant cette période. Si nous supposons que le style se meut en ligne droite, ce qui peut être considéré comme suffisamment exact, à cause de la grandeur du rayon de la circonférence qu'il parcourt, on aura, y étant le chemin parcouru par le style et que l'on peut mesurer, ϖ étant la pression du gaz à un instant quelconque

$$\varpi = ky + r\frac{d^2y}{dt^2};$$

ky est la pression développée par le ressort lorsque le style a parcouru le chemin y; $r\frac{d^2y}{dt^2}$ est la force accélératrice.

Pour déterminer le coefficient r, nous remarquerons que lorsque le style vibre, la tension d'équilibre du ressort restant constante, on a

$$y = a \sin 2\pi \frac{t}{T}$$

et par conséquent

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -\frac{4\pi^2}{T^2}y.$$

Si P est la tension du ressort, on a

$$r\frac{d^2y}{dt^2} = -P = -ky,$$

r étant un coefficient qui joue le même rôle que la masse dans le cas d'un mobile isolé; on aura donc, en multipliant par r

$$r\frac{d^2y}{dt^2} = -P = -\frac{4\pi^2}{T^2}ry = -ky,$$

d'où l'on tire

$$r = k\frac{T^2}{4\pi^2}.$$

Le coefficient r représente donc en quelque sorte la masse du style. On a ainsi

$$\varpi = ky + k\frac{T^2}{4\pi^2}\frac{d^2y}{dt^2}$$

ou encore

$$\frac{\varpi}{k} = y + \frac{T^2}{4\pi^2}\frac{d^2y}{dt^2}.$$

Nous pouvons calculer $\frac{d^2y}{dt^2}$ puisque la courbe donne $y = f(t)$; nous connaissons d'ailleurs la durée des vibration du ressort ; nous pouvons donc calculer la pression gazeuse ϖ à un instant quelconque de la propagation. Les calculs ne seront jamais trés précis à cause de la difficulté de mesurer y avec assez d'exactitude pour que les $\frac{d^2y}{dt^2}$ soient bien exactement connus, mais ils nous feront connaître les principales circonstances de la propagation.

Propagation dans l'expérience (4 XI, 3). — Nous prendrons comme exemple l'expérience (4 XI, 3) faite avec le cyanogène brûlant dans l'air pour CO.

Comme on le voit *fig.* 9, Pl. XV, la période de propagation a duré 3 vibrations environ. On partage chaque durée de vibration en dix parties égales, et on mesure les ordonnées de chacun des points ainsi obtenus. On obtient ainsi le tableau suivant dans lequel les ordonnées représentent toujours des pressions mesurées en centimètres.

4 XI, 3.

TEMPS en dixièmes de vibration. (1)	y (2)	$2\frac{dy}{dt}$ (3)	$4\frac{d^2y}{dt^2}$ (4)	$\frac{T^2}{4\pi^2}\cdot\frac{d^2y}{dt^2}$ (5)	$\varpi-h$ (6)	ϖ (7)	$2\frac{d\varpi}{dt}$ (8)	$4\frac{d^2\varpi}{dt^2}$ (9)
2	0							
3								
4								
5								
6	10							
7	14	9						
8	19	11	5	3	22	85		
9	25	14	6	4	29	92	15	
10	33	17	7	4	37	100	18	7
11	42	21	8	5	47	110	22	9
12	54	25	7	5	59	122	27	10
13	69	28	11	7	74	137	32	10
14	84	37	11	8	90	154	37	12
15	104	39	9	9	113	174	44	13
16	123	46	16	10	133	198	50	16
17	150	57	18	11	161	224	60	19
18	180	64	16	10	190	258	69	22
19	214	73	26	16	230	293	82	22
20	253	90	38	24	277	340	91	9
21	304	111	27	17	321	384	91	11
22	364	117	7	4	368	431	102	28
23	421	118	4	2	423	486	111	− 8
24	482	121	− 5	− 3	479	542	94	− 28
25	542	103	− 42	− 26	516	589	83	− 23
26	585	79	− 46	− 29	556	619	71	− 26
27	621	57	− 43	− 27	594	657	57	− 34
28	642	36	− 37	− 23	619	682	37	− 52
29	657	20	− 42	− 26	631	694	5	− 52
30	662	− 6	− 60	− 38	624	687	− 15	− 11
31	651	− 40	− 56	− 35	616	679	− 6	
32	622	− 62	− 7	− 4	618	681		
33	589	− 47	+ 25					
34	575	− 37						
35	552							

La colonne 7 donne la pression ϖ du gaz telle qu'elle s'exerce à chaque instant. Nous pouvons contrôler immédiatement l'exactitude de notre calcul, car l'ordonnée notée ici 30 correspond à celle que, dans le relevé de la période de

refroidissement, nous avons appelée o,5. Ce point est celui où le maximum de pression est obtenu ; il marque donc à la fois la fin de la période de la propagation, et le commencement de celle du refroidissement. Or nous avons trouvé pour ce point (V. page 415) $\varpi - h = 625^{cm}$, ce qui confond se avec la valeur 624^{m} que nous venons de trouver par une méthode entièrement différente.

La *fig.* 1, Pl. XVI, montre à la fois la courbe (en trait continu) décrite par le style, c'est-à-dire $y = f(t)$, et la courbe (en points longs) qu'aurait décrite le même style s'il avait suivi la variation de pression du gaz sans prendre d'accélération.

La forme malheureusement défectueuse que nous avions donnée à l'enceinte qui contenait notre gaz, fait que la propagation se partage en deux périodes. En effet l'inflammation, produite au centre du cylindre par l'étincelle, se propage d'abord à partir de ce point en formant une sorte d'onde sphérique enflammée qui s'accroît sans cesse jusqu'à ce qu'elle vienne toucher les parois du cylindre. Le cylindre ayant une hauteur égale à son diamètre, l'onde, si elle reste sphérique, vient toucher à la fois les parois latérales et les deux fonds plats. La seconde période de la propagation commence à cet instant et se termine au moment où la flamme atteint la courbe d'intersection des fonds plats et de la paroi cylindrique.

Pendant la première période, la propagation doit se faire sans refroidissement sensible, puisque l'onde enflammée ne touche pas encore les parois. Il n'y a donc alors d'autre perte que celle qui peut provenir du rayonnement et celle, encore plus faible, due au refroidissement, sous l'action de la paroi, de la portion des gaz non enflammés qui la touche, et qu'échauffe la compression produite par l'augmentation de volume de la portion brûlée. Ces deux causes de refroidissement peuvent être considérées comme négligeables.

Pendant la seconde période, au contraire, il y a refroidissement sous l'action des parois, et le refroidissement va même en croissant avec la propagation, puisque la portion de la surface du cylindre qui est en contact avec la paroi va sans cesse en croissant (*).

Rapport de la durée de la propagation sans refroidissement à la durée totale de la propagation. — La loi de la propagation, et par suite celle de l'accroissement de pression doivent donc être très différentes dans l'une et l'autre période, et l'on peut, en se fondant sur cette déduction, chercher à assigner le moment où finit la première et commence la seconde.

Nous pouvons, pour résoudre la question, étudier la loi de variation de la pression ϖ avec le temps, loi qu'exprime la colonne (7) du tableau précédent. Nous sommes amenés ainsi à former les $\frac{d\varpi}{dt}$ et $\frac{d^2\varpi}{dt^2}$.

Les valeurs de $2\frac{d\varpi}{dt}$ et $4\frac{d^2\varpi}{dt^2}$ sont inscrites dans les colonnes (8) et (9).

Les courbes représentant $2\frac{d\varpi}{dt}$ et $4\frac{d^2\varpi}{dt^2}$ sont données dans la *fig.* 2, Pl. XVI.

En examinant la courbe $2\frac{d\varpi}{dt}$, on voit que cette courbe suit une marche très régulière jusque vers l'abscisse 17.

(*) Il faut d'ailleurs remarquer que la propagation de la flamme doit se faire ici dans des conditions de régularité bien différentes de celles que l'on observe lors de la propagation dans un tube. Il ne se produit en effet aucune cause qui tende à provoquer des vibrations dans la masse non brûlée, telle que l'échappement des gaz par l'un des orifices du tube. Or nous avons vu, dans notre précédent mémoire, que ce sont précisément ces vibrations qui troublent la vitesse de propagation en l'accélérant.

Au delà la courbure change de signe et le taux d'accroissement de la pression subit une évidente diminution. Cette particularité devient encore plus manifeste sur la courbe qui représente $4 \frac{d^2\varpi}{dt^2}$, qui présente son maximum vers l'abscisse 18.

On peut conclure de là que la période de propagation sans refroidissement commence à l'origine de la combustion qui correspond à l'abscisse 2 et cesse à l'abscisse 17,5, ayant ainsi une durée égale à 15,5 dixièmes de vibration. La propagation accompagnée de refroidissement dure depuis l'abscisse 15,5 jusqu'à l'abscisse 29,5, soit pendant 12,0 dixièmes de vibration. Si nous appelons D_s la durée de la propagation sans refroidissement (qui est en même temps la propagation suivant une onde sphérique), D_r la durée de la propagation avec refroidissement, nous aurons donc

$$D_p = 27,5 \qquad D_s = 15,5 \qquad \frac{D_s}{D_p} = 0,56.$$

Cette donnée est importante, car si l'on pouvait regarder la propagation comme se faisant avec la régularité théorique, il serait permis de regarder $\frac{D_s}{D_p}$ comme constante dans toutes les expériences; le chemin à parcourir par la flamme dans chacune des deux périodes étant toujours le même, et toute cause qui tend à accélérer l'une tendant à accélérer l'autre dans le même rapport.

Nous avons répété les mêmes opérations sur plusieurs de nos expériences, choisies parmi celles qui donnaient la propagation la plus lente.

Pour l'expérience (1 VII, 1) on a

$$D_p = 7,75$$
$$D_s = 3,25 \qquad D_r = 4,50 \qquad \frac{D_s}{D_p} = 0,42.$$

Pour l'expérience (8 V, 3), on a

$$D_p = 12^{\text{vib.}}$$

$$D_e = 4,25 \quad D_s = 7,5 \quad \frac{D_e}{D_p} = 0,35.$$

On voit que $\frac{D_e}{D_p}$, quoique variant beaucoup moins que D_p diminue lorsque D_p augmente. On comprend facilement ce résultat, car pour admettre l'invariabilité de $\frac{D_e}{D_p}$, il faut supposer que l'onde enflammée vient toucher au même instant les parois latérales et les deux fonds du cylindre. C'est ce qui aurait lieu si l'inflammation était toujours bien centrale et si la propagation de l'inflammation avait toujours lieu, pendant la première période, suivant des ondes sphériques concentriques. Il faudrait pour cela que les différences considérables de densité engendrées par la combustion ne produisissent pas de courants dans la masse, car ces courants auraient pour résultat d'accélérer le mouvement de la flamme vers le haut du cylindre, hâtant par conséquent le moment où la flamme vient toucher l'une des parois et où commence le refroidissement. L'effet de ces courants, s'ils se produisent, sera d'abréger la première période pour allonger la seconde. C'est précisément ce que montre l'expérience.

On peut donc, par ce qui précède, constater l'existence, et jusqu'à un certain point apprécier l'importance de ces courants gazeux. Dans le cas qui nous occupe, ils sont en quelque sorte portés au maximum, car la différence de densité entre le gaz non brûlé et le gaz brûlé est considérable. Cependant leur influence est, en définitive, assez limitée puisque, la durée totale de la propagation variant de 3 à 12, le rapport $\frac{D_e}{D_p}$ varie seulement de 0,56 à 0,375. Il est donc, d'après cela, permis de penser que l'in-

fluence de ces courants est assez peu sensible pendant le refroidissement du gaz brûlé, les différences de densité entre les diverses parties du gaz étant alors beaucoup moins grandes.

D'après les trois expériences précédentes, la variation du rapport $\frac{D_s}{D_p}$ est à peu près proportionnelle à la durée D_p, et donnerait à la limite, pour $D_p = 0$, un rapport $\frac{D_s}{D_p} = 0,60$. Nous pouvons donc, sans grande erreur, considérer $\frac{D_s}{D_p} = 0,60$ comme s'appliquant aux mélanges gazeux dans lesquels la vitesse de propagation est grande.

Le rapport de la longueur parcourue dans la première période à celle qui est parcourue pendant toute la propagation est d'ailleurs celui de 1 à 1,42, soit 0,70. La propagation marche donc un peu plus vite pendant la première période que pendant la seconde.

Expression mathématique de la loi de propagation. — Nous pouvons, au moyen de la loi des variations de ϖ pendant la propagation, prendre une idée assez précise des circonstances de cette propagation. Pour y arriver, il nous faut établir quelques formules. Soit :

p_0 la densité du mélange gazeux avant la combustion,
l la contraction de l'unité du volume après la combustion,
1 le volume total du cylindre,
v le volume actuel du gaz brûlé, c'est-à-dire le volume de l'onde enflammée,
ϖ la pression dans le cylindre,
h la pression initiale,
τ la température absolue de combustion à volume constant,
τ_0 la température absolue initiale.

Nous cherchons ϖ en fonction de v.

Le volume non enflammé $(1 - v)$ était à la température τ_0

et à la pression h, et il a été comprimé jusqu'à la pression ϖ; si l'on suppose qu'il n'a pas fait de gain extérieur de de chaleur, sa température est devenue τ'_0 et l'on a

$$\frac{\tau'_0}{\tau_0} = \left(\frac{\varpi}{h}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

γ étant le rapport des deux chaleurs spécifiques, supposé constant entre τ_0 et τ'_0. Pour les gaz parfaits, on a, à la température ordinaire, $\frac{\gamma-1}{\gamma} = 0,29 = \frac{0,41}{1,41}$. Nous poserons pour abréger,

$$\frac{\gamma-1}{\gamma} = \alpha;$$

il vient donc

$$\frac{\tau'_0}{\tau_0} = \left(\frac{\varpi}{h}\right)^{\alpha}.$$

Le gaz brulé serait à la température τ (*) si le volume en était resté constant, mais il s'est dilaté, et sa véritable température est τ'. En admettant toujours qu'il n'y ait eu ni gain ni perte de chaleur, on aura

$$\frac{\tau'}{\tau} = \left(\frac{\varpi}{y}\right)^{\alpha'}$$

α' étant la valeur du rapport $\frac{\gamma-1}{\gamma}$ à la température τ'.

La pression y est celle qui serait supportée par une masse de gaz de densité $\frac{p_0}{1-l}$, et à la température τ, tandis que la même masse de gaz, avec le même volume, une densité p_0 et une température τ_0 supporte une pression h; on a donc

$$\frac{h}{\tau_0} = \frac{y}{\tau(1-l)}$$

(*) Nous admettons que la température du volume du gaz brûlé est uniforme, négligeant l'influence de la tranche actuellement en combustion, et celle de la répartition variable des températures dans la masse.

et par conséquent

$$y = h\frac{\tau(1-l)}{\tau_0}.$$

Si l'on admettait la loi de Laplace, fondée sur la constance des chaleurs spécifiques des gaz, on aurait donc

$$\frac{\tau'}{\tau} = \left(\frac{\varpi}{h}\right)^\alpha \left[\frac{\tau_0}{\tau(1-l)}\right]^\alpha.$$

La formule n'est plus applicable, lorsque α subit une variation considérable. Pour les gaz simples, nous verrons plus loin que la chaleur spécique moyenne à volume constant entre 0 et 2500° passe de 4,8 à 6,2, subissant ainsi un accroissement de 1,4 environ, ce qui correspond à un accroissement égal à 2,8 pour la chaleur spécifique absolue.

Le rapport des chaleurs spécifiques sera ainsi à 2500°

$$\frac{8,2}{6,2} = 1,32,$$

tandis qu'à 0° il est

$$\frac{6,8}{4,8} = 1,41.$$

Si τ' est égal à 2500°, il conviendra, en conservant la formule de Laplace, de prendre pour γ une valeur intermédiaire entre 1,32 et 1,41, soit 1,36.

On aurait ainsi pour α la valeur $\frac{0,36}{1,36} = 0,265$ au lieu de $\frac{0,41}{1,41} = 0,29$. Dans le calcul d'approximation qui va suivre, on peut donc conserver la formule de Laplace et supposer que α est constant, sans commettre une grande erreur.

Ayant les températures τ'_0 et τ' en fonctions de ϖ, τ_0 et τ, nous allons écrire que le poids du gaz est resté constant

dans le cylindre, ce qui donnera, p_0 étant la densité,

$$\frac{\varpi v}{(1-l)\tau} p_0 + \frac{\varpi(1-v)}{\tau'_0} p_0 = \frac{h}{\tau_0} p_0.$$

Remplaçant τ'_0 et τ' par les expressions précédemment trouvées, il vient

$$\frac{\varpi v(1-l)^\alpha}{\tau\left(\frac{\varpi}{h}\right)^\alpha\left(\frac{\tau_0}{\tau}\right)^\alpha(1-l)} + \frac{\varpi(1-v)}{\tau_0\left(\frac{\varpi}{h}\right)^\alpha} = \frac{h}{\tau_0},$$

ou, en multipliant par $\frac{\tau_0}{h^\alpha}$, et posant pour abréger,

$$k = \left[\frac{\tau_0}{\tau(1-l)}\right]^{1-\alpha};$$

$$\varpi^{1-\alpha} = \frac{h^{1-\alpha}}{1-v(1-k)}. \qquad (a)$$

Cette expression donne une relation entre la pression observée ϖ et le volume v de l'onde enflammée. Si l'on remarque que k est une constante, puisque la température τ est la température de combustion, on peut connaître au moyen de cette formule les variations de v, c'est-à-dire la loi de la propagation.

Appliquée à l'expérience (3 XI, 3) dans laquelle les produits de la combustion sont de l'azote et de l'oxyde de carbone, la formule (a) donne pour chaque dixième de vibration, compté à partir de l'origine de la combustion, des valeurs de $(1-k)\,v$ qui sont représentées par les ordonnées de la courbe (*fig.* 3, Pl. XVI).

On voit sur cette courbe que, à partir de l'inflammation, le volume, après s'être accru assez lentement croît à peu près proportionnellement au temps jusqu'à la fin de la période de propagation sphérique, pour prendre ensuite une marche beaucoup plus lente, qui est d'ailleurs déterminée par la nature du vase dans lequel la flamme se meut.

Sauf pendant les premiers instants, le volume de l'onde

enflammée croît donc proportionnellement au temps pendant toute la durée de la propagation sphérique, c'est-à-dire tant que la flamme peut se propager librement, sans être gênée par la forme du vase.

Si l'on appelle r le rayon de l'onde enflammée, l'accroissement différentiel de volume de cette onde est

$$\pi r^2 \frac{dr}{dt} dt.$$

Cet accroissement étant constant, la quantité $\frac{dr}{dt}$ qui représente l'accroissement linéaire, ou ce que l'on peut appeler la vitesse de propagation, varie à chaque instant en raison inverse du carré du rayon de l'onde.

Puisque nous avons déterminé le moment où l'onde sphérique vient toucher les parois du cylindre, et que nous connaissons : 1° le volume de l'onde en ce moment, ou le rapport entre ce volume et le volume total du cylindre, lequel est égal à $\frac{\frac{4}{3}\pi r^3}{2\pi r^3} = \frac{2}{3}$; 2° la pression ϖ qui s'exerce dans le cylindre à cet instant; la formule (a) peut nous permettre de calculer k, d'où l'on peut déduire τ, c'est-à-dire la température de combustion. Ce calcul ne saurait être bien exact, mais il est bon de l'exécuter pour apprécier l'exactitude de notre formule, et celle de la marche que nous avons suivie pour obtenir la durée de la période sphérique de propagation.

En effectuant les calculs, on trouve que si l'on supposait que le volume $v = \frac{2}{3}$

était obtenu	pour le temps	17,	on aurait	$\tau = 5900°$
—	—	16,	—	$\tau = 2690°$
—	—	15,	—	$\tau = 2300°$.

Nous verrons qu'en réalité $\tau = 2780°$; la fin de la pre-

mière période de propagation se produit donc entre 16 et 17, tandis que nous avions trouvé, par un procédé tout différent, qu'elle était effectuée entre 17 et 18. L'accord est satisfaisant pour des mesures et des calculs aussi délicats. Ainsi se trouve vérifiée l'hypothèse faite, que la propagation s'effectue avec régularité, pendant toute la première période de la propagation, suivant des ondes sphériques concentriques, à peine altérées par les courants gazeux.

Recherche de la perte de température subie pendant la durée de la propagation avec refroidissement. — Nous pouvons encore faire servir la formule (a), à une autre étude qui a un grand intérêt pour la recherche des températures de combustion. Nous obtenons, par les calculs que nous développerons plus loin, une valeur au moins approchée de τ; nous pouvons donc calculer la valeur de k, et par conséquent celle de v à chaque instant, puisque nous connaissons $k(1 - v)$. Nous pouvons ainsi calculer les variations de v pendant la seconde période de la propagation, c'est-à-dire pendant que la flamme se propage dans l'espace compris entre la sphère tangente aux parois intérieures du cylindre et ces mêmes parois.

On peut d'ailleurs admettre que la flamme continue pendant cette période à se propager sphériquement, de telle sorte que la surface soit limitée à chaque instant par des portions de sphères ayant pour centre commun celui du cylindre. La surface de contact de la flamme avec les parois du cylindre va en augmentant à mesure que la flamme avance, et si l'on appelle s le rapport de cette surface de contact à la surface intérieure totale du cylindre, un simple calcul géométrique donnera la valeur de s en fonction du volume v qu'occupe la flamme.

Puisque, par le procédé indiqué plus haut, on connaît empiriquement v en fonction du temps t, on pourra donc

obtenir s en fonction du temps, c'est-à-dire savoir quelle est la loi d'accroissement, avec le temps, de la surface de contact entre la flamme et le cylindre.

Sans qu'il soit nécessaire de développer ces calculs, on aura une idée suffisante du résultat qu'ils donnent en jetant les yeux sur la courbe de la *fig.* 4, Pl. XVI, dont les ordonnées sont s et les abscisses le temps t, pour l'expérience (3 XI, 3). On voit que cette courbe est peu différente d'une droite. On en conclut que la surface de contact s croît à peu près proportionnellement au temps t.

Nous verrons plus loin quel usage nous ferons de cette donnée expérimentale pour calculer la perte de température que subit la flamme, sous l'influence du contact de la paroi froide, pendant la seconde période de la propagation.

III. Pressions développées par la combustion et température de combustion.

Nous pouvons aborder maintenant la recherche des pressions développées par la combustion des mélanges gazeux expérimentés, et nous allons d'abord exposer le procédé de calcul adopté. Il diffère un peu de celui que nous avions suivi autrefois, et qui consistait à fixer deux limites, aussi rapprochées que possible, entre lesquelles la pression cherchée devait être comprise, puis à prendre la moyenne de ces deux nombres extrêmes. Les nombres que nous donnerons ici seront donc un peu différents de ceux que nous avons publiés dans les différents recueils qui ont bien voulu insérer nos résultats provisoires. Ces différences ne sont d'ailleurs pas très considérables et laissent, comme nous l'avons déjà dit, subsister toutes nos conclusions.

Procédé employé pour la détermination de la pression maxima Π, développée par la combustion. — En se reportant à ce que nous avons dit plus haut sur le procédé au moyen duquel on mesure, lorsque le manomètre vibre, la pression exercée par le gaz contenu dans le cylindre, on verra que, dans ce cas, qui est presque général, le point de la courbe des pressions, le plus rapproché du maximum, que nous pouvons mesurer directement avec une précision suffisante, correspond à l'élongation minima du style qui suit la première élongation maxima. Ce point est celui que nous avons toujours appelé 1. Pour mesurer la pression du gaz qui s'exerce lors de la première élongation maxima, c'est-à-dire au point 0,5, il faut en effet prolonger au sentiment la courbe tangente aux élongations minima du style. On ne peut avoir ainsi qu'une mesure approximative, très insuffisante quand les premières vibrations ont une grande amplitude. Nous mesurons donc la pression correspondant au point 0,5, et qui est la pression maxima développée dans le cylindre, en prolongeant, jusqu'à ce point, la courbe des pressions, telle que nous l'avons déterminée depuis les pressions inférieures jusqu'au point 1 inclusivement.

Bien qu'on fasse ainsi une véritable extrapolation, le calcul peut être considéré comme très exact, surtout si l'équation de la courbe est bien définie, car le point où s'arrête l'extrapolation est très voisin de celui où finit la portion connue de la courbe.

Lorsque le mélange gazeux est partiellement dissocié à la température de combustion, on ne peut plus déterminer, d'une façon aussi satisfaisante, la loi de refroidissement des gaz au-dessous et dans le voisinage de la première vibration. L'équation de la portion connue de la courbe est alors moins bien assurée. Aussi ne peut-on obtenir dans ce cas que des valeurs assez incertaines de la pression maxima Π.

Cas des gaz permanents. — Dans le cas des gaz permanents, nous avons vu que la chute de pression est exprimée par la formule

$$\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - \varpi_0) + b(\varpi - \varpi_0)^2.$$

L'équation de la courbe qui représente les valeurs de ϖ en fonction du temps, s'obtient donc par l'intégration de l'équation

$$\frac{d\varpi}{(\varpi - \varpi_0) + \frac{b}{a}(\varpi - \varpi_0)^2} = a dt$$

et est par conséquent

$$\text{L.}\frac{\varpi - \varpi_0}{1 + \frac{b}{a}y} = at + \text{C}.$$

Mais le terme $a(\varpi - \varpi_0)$ est toujours très petit, vis-à-vis du terme du second degré, pour les pressions élevées auxquelles nous avons à appliquer la formule. On ne fait donc aucune erreur sensible en négligeant ce terme du premier degré, et la formule devient alors

$$\frac{d\varpi}{(\varpi - \varpi_0)^2} = \frac{1}{b} dt$$

ou

$$-d\frac{1}{\varpi - \varpi_0} = \frac{1}{b} dt.$$

On emploie donc le procédé de calcul suivant. On prend l'inverse des premières valeurs mesurées de $\varpi - \varpi_0$, et on forme les différences de ces valeurs, pour un même intervalle de temps $dt = 1$. Ces différences doivent être sensiblement constantes et égale à $\frac{1}{b}$. Il suffit alors de retrancher de $\left(\frac{1}{\varpi - \varpi_0}\right)_1$ correspondant à 1, la moitié de $\frac{1}{b}$,

pour obtenir $\frac{1}{(\varpi - \varpi_0)_{0,5}}$, d'où l'on déduit sans peine $(\varpi - \varpi_0)_{0,5}$.

Prenons comme exemple l'expérience (4 XI, 3).

	$\varpi - \varpi_0$	$10^5 . \frac{1}{\varpi - \varpi_0}$	$\frac{d}{dt} . \frac{1}{\varpi - \varpi_0} \times 10^5$.	
1	587	170		
1,5	563	178	14	
2	542	184	14	
2,5	521	192	14	
3	504	198	13	
3,5	487	205	15	
4	470	213	15	
4,5	455	220	14	
5	441	227	15	Moyenne, 14,3.
5,5	425	235	15	
6	413	242	14	
7	390	256	14,5	
8	369	271	14,5	
9	351	285	14,5	
10	333	300	14	
11	320	313		

On peut donc prendre $10^5 \times 14,3$ pour la valeur de $\frac{1}{b}$, ce qui donne

$$10^{-5} \frac{1}{(\varpi - \varpi_0)_{0,5}} = 170 - \frac{14,3}{2} = 1629$$

et par conséquent

$$(\varpi - \varpi_0)_{0,5} = 614.$$

Cette valeur diffère fort peu de celle (615) que nous avons mesurée directement. Il est vrai que, dans le cas que nous avons choisi, la faiblesse des amplitudes vibratoires était particulièrement favorable pour la mesure.

Cas des gaz entièrement condensables. — Lorsque l'on a, ce qui est le cas par exemple pour le mélange tonnant

d'hydrogène et d'oxygène,

$$\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0),$$

on trouve

$$\frac{d\varpi}{(\varpi - p_0)} = adt,$$

ou

$$d\log(\varpi - p_0) = Madt.$$

M étant égal à log *e*.

Il suffit donc pour avoir $\log(\varpi - \varpi_0)_{0,5}$ de former les valeurs successives de $\log(\varpi - \varpi_0)$, de chercher la différence correspondant à la durée d'une vibration, et d'ajouter la demi-valeur de cette différence à $\log(\varpi - \varpi_0)_1$.

Cas des gaz partiellement condensables. — Pour un grand nombre de mélanges, la loi de variation de $\varpi - \varpi_0$ pour les hautes pressions, c'est-à-dire celle qui nous importe ici, est représentée, comme on l'a vu, par

$$\log \frac{1}{\varpi - p_0} \frac{d\varpi}{dt} = a + b(\varpi - p_0)$$

ou en posant $a = \log \alpha$ et $Mb = \beta$

$$\alpha(\varpi - p_0)\frac{d\varpi}{dt} = e^{\beta(\varpi - p_0)}$$

ou encore

$$\frac{d\varpi e^{-\beta(\varpi - p_0)}}{\varpi - p_0} = \alpha dt.$$

Si l'on pose

$$y = -\beta(\varpi - p_0).$$

cette expression peut encore se mettre sous la forme

$$\frac{e_y}{y}dy = \alpha dt,$$

ou encore

$$d\int\frac{e_y}{y}dy = \alpha dt.$$

Or $\int \frac{e_y}{y} dy$ est une fonction de y qu'ont étudiée les analystes et à laquelle ils ont donné le nom de *logarithme intégral*. Si nous représentons cette fonction par $li\,y$, on aura

$$d.\,li\,[-\beta(\varpi - p_0)] = \alpha dt.$$

Le précieux recueil de M. Hoüel (*) donne une table des valeurs de $li\,y$.

On peut donc, dans le cas considéré, pour obtenir la valeur de $\varpi_{0,\beta}$, diriger les calculs comme il suit.

La construction de la courbe qui a pour équation

$$\log \frac{1}{\varpi - p_0} \; \frac{d\varpi}{dt} \; \log \alpha + \frac{\beta}{M}(\varpi - p_0)$$

donne les coefficients α et β. On peut ainsi calculer la valeur de $\beta(\varpi - p_0)_1$ et chercher dans la table $li\,\beta(\varpi - p_0)_1$. En retranchant de ce li une quantité égale à $\frac{1}{2}\alpha$, on aura

$$li\,6(\varpi - p_0)_{10,\beta},$$

d'où l'on déduira la valeur de $(\varpi - p_0)_{0,\beta}$.

Comme l'épure ne fait pas connaître $\log \alpha$ avec une très grande précision, on peut chercher β directement en formant les $li\,\beta(\varpi - p_0)$ pour les vibrations successives, à partir de 1, et calculant les différences de ces valeurs.

Nous allons donner comme exemple le calcul de l'expérience (26 X, I), faite sur un mélange d'hydrogène et d'air.

La courbe a donné

$$M\beta = 0{,}00335 \quad \text{d'où} \quad \beta = 0{,}00772.$$

On forme alors le tableau suivant

(*) *Recueil des formules et des tables numériques.* P. 61.

	$\varpi - p_0$	$\beta(\varpi - p_0)$	$li\,[-\beta(\varpi - p_0)]$	$\frac{d}{dt}\,li\,[-\beta(\varpi - p_0)]$.	
1	297	228	0,33		
2	254	196	0,51	0,19	
3	224	173	0,71	0,20	
4	202	156	0,91	0,20	
5	185	143	1,11	0,195	Moyenne 0,196 = α
6	171	132	1,30	0,205	
7	160	123	1,51	0,20	
8	150	116	1,70		

On en déduit

$$li\,[-\beta(\varpi - p_0)]_{0,5} = 0,33 - 0,0098 = 0,232$$
$$\beta(\varpi - p_0)_{0,5} = 228$$
$$(\varpi - p_0)_{0,5} = 296.$$

On voit que, dans tous les cas, on peut obtenir avec une grande précision la valeur de $\varpi_{0,5}$ qui est, dans les mélanges à propagation peu rapide, la pression maxima exercée dans le cylindre par le gaz brûlé.

Pour les mélanges à propagation rapide, il faut, pour obtenir cette pression maxima, prolonger la courbe $\varpi = f(t)$ non plus seulement jusqu'au temps 0,5, mais jusqu'à l'instant où finit la propagation. Cet instant peut être obtenu de deux façons différentes qui se contrôlent l'une l'autre.

Supposons, pour fixer les idées, qu'il s'agisse d'un mélange contenant 1^v $(CO + O) + p\,CO^2$. Nous nous servirons de la courbe donnant la loi qui lie la durée de la propagation à la quantité d'acide carbonique ajoutée au mélange tonnant. Cette courbe est, pour les mélanges rapides, à peu près une ligne droite passant presque par l'origine, car la fraction de vibration qui représente la durée de la propagation pour le mélange tonnant est très petite. Telle est la première méthode.

La seconde méthode consiste à déterminer la durée D, de la période de propagation sphérique. On y arrive assez aisément, et avec une approximation suffisante en se fondant

sur le fait énoncé plus haut (page 476), que la fin de cette période correspond au maximum de $\frac{d^2\varpi}{dt^2}$ lequel se produit à peu près en même temps que le maximum de $\frac{d^2y}{dt^2}$, y étant l'ordonnée de la courbe décrite par le style. Il suffit donc de fixer, ce qui se fait assez aisément, le point où la courbe décrite par le style a sa courbure maxima. La longueur comprise entre ce point et l'origine de la combustion, étant rapportée à la longueur qu'occupe une vibration du manomètre, donne D_s. Or nous avons vu que l'on peut poser, pour les mélanges à propagation rapide $\frac{D_s}{D_p} = 0,60$ (page 478), ce qui fait connaître D_p.

On peut donc toujours ainsi obtenir avec une assez grande précision, la valeur de la pression maxima Π qui est réellement exercée dans le cylindre par le gaz brûlé. Mais cette pression n'est pas celle que nous cherchons, c'est-à-dire celle qu'exercerait le gaz brûlé si, pendant la propagation de la combustion, le gaz ne perdait aucune quantité de chaleur.

A cause de la forme de l'enceinte, la durée de la propagation se partage, comme on l'a vu, en deux périodes très distinctes. Pendant la première, la propagation peut être considérée comme n'étant accompagnée d'aucun refroidissement notable; pendant la seconde, au contraire, l'influence refroidissante des parois est notable, et il importe d'en calculer l'effet qui devra être ajouté à la pression maxima observée ou calculée pour obtenir la pression cherchée.

Correction relative au refroidissement qui se produit pendant cette période de la propagation dont la durée est égale à D_r. — Pendant la période de refroidissement sans propagation, la variation de pression est re-

présentée par une expression de la forme

$$\frac{d\varpi}{f(\varpi)} = adt.$$

Pendant la période de propagation avec refroidissement, si nous admettons qu'à surface de refroidissement égale, la variation de pression suit la même loi, on aura

$$\frac{d\varpi}{f(\varpi)} = asdt.$$

Pendant la période considérée, la surface s de contact entre le gaz brûlé et la paroi est variable à chaque instant, mais nous avons vu qu'elle varie à très peu près porportionnellement au temps. Comme elle est égale à o au commencement, et à 1 à la fin de la période dont nous représenterons la durée par D_r, nous aurons, au temps t quelconque écoulé depuis le commencement de la période,

$$s = \frac{t}{D_r}.$$

On aura donc

$$\frac{d\varpi}{f(\varpi)} = \frac{atdt}{D_r}$$

et si nous intégrons entre les limites de temps, o et D_r, la perte de pression produite par l'influence de la paroi sera donnée par l'équation

$$\int_0^{D_r} \frac{d\varpi}{f(\varpi)} = \int_0^{D_r} \frac{atdt}{D_r} = \frac{aD_r}{r},$$

c'est-à-dire qu'il suffirait de prolonger, d'un temps égal à la demi-durée de la propagation avec refroidissement, la courbe des pressions, pour obtenir la pression réellement due à la combustion. Pour cette opération, on suivrait la même marche que celle qui a été exposée pour trouver la pression maxima réellement développée. La seule différence consisterait en ce qu'au lieu d'arrêter ce prolongement au moment

où la pression maxima réelle s'exerce, on ne s'arrêterait qu'à l'instant qui correspond au milieu de la période dont la durée est D_r.

Cela reviendrait à ajouter à la pression maxima ϖ_m, une correction C représentant l'accroissement de l'ordonnée de la courbe des pressions pendant la durée $\frac{1}{2} D_r$.

Pour que ce mode de correction fût exact, il faudrait que la température de la masse gazeuze variât, en passant de la pression Π à la pression ϖ_m pendant la durée D_r, suivant la même loi que cela a lieu lorsque la propagation est achevée. Il ne peut pas en être rigoureusement ainsi parce que, pendant la propagation, la surface libre de l'onde enflammée est à une température constante qui est la température de combustion. La correction C telle qu'on vient de la calculer est donc trop faible et ne donne qu'une valeur Π_1, approchée *par défaut* de la pression Π cherchée.

Pour avoir une limite supérieure de Π, nous remarquerons qu'on ferait une correction trop considérable si l'on supposait que pendant la durée $\frac{1}{2} D_r$ la pression finale la plus faible est égale à Π, ou même à sa valeur approchée par défaut Π_1. Cette correction C′ est celle que l'on obtiendrait en prolongeant la courbe jusqu'à l'instant qui correspond non plus au milieu, mais au commencement de la durée D_r et prenant la différence des ordonnées correspondant respectivement au commencement et à la fin du temps D_r. La pression Π sera ainsi comprise entre une valeur trop faible $\varpi_m + C$ et une valeur trop forte $\varpi_m + C'$. On pourra adopter pour Π la valeur moyenne $\varpi_m + \frac{C+C'}{2}$.

Prenons pour exemple l'expérience (4 XI, 3). Nous avons trouvé

$$D_r = 1^s,2, \quad \text{et} \quad \frac{d}{dt} \cdot \frac{1}{\varpi - \varpi_0} = 14.10^6.$$

Nous aurons donc

		$\varpi - \varpi_0$	$10^5 . \frac{1}{\varpi - \varpi_0}$	$10^5 . d . \frac{1}{\varpi - \varpi_0}$.
$\frac{D_r}{2} = 0^v,6$		686	145,7	
				8,6
		649	154,3	
$\frac{D_r}{2} = 0^v,6$				8,6
	0,5	614	162,9	
				7,15
	1	587	170	

On a ainsi

$$C = 649 - 614 = 35$$
$$C' = 686 - 649 = 37.$$

On prendrait comme correction $36 = \frac{35 + 37}{2}$, ce qui donnerait

$$\Pi - \varpi_0 = 614 + 36 = 650.$$

La différence entre C et C′ est ici très faible parce que le taux de refroidissement est très petit, la durée D_r relativement peu considérable, et les pressions élevées. Mais il en peut-être autrement, comme cela se présente dans l'expérience suivante.

(1 VII, 1.)

$1^v (CO + O) + 1^v,4\, CO^2.$

$D_r = 4,5 \qquad d . \frac{1}{\varpi - \varpi_0} = 16,7 . 10^{-5}.$

		$\varpi - \varpi_0$	$10^5 . \frac{1}{\varpi - \varpi_0}$.
$2^v,25$		428	233,7
		365	274,2
$2^v,25$	0,5	322	311,7

On a

$$C = 365 - 322 = 43$$
$$C' = 428 - 365 = 63.$$

On prendra

$$\Pi - \varpi_0 = 322 + \frac{43 + 63}{2} = 375.$$

Vérification du procédé de correction employé. — Pour voir si les déductions qui nous ont amenés à notre procédé de correction sont valables, nous allons l'appliquer à un cas en quelque sorte limite, où la durée D_r est extrêmement considérable, où la différence entre C et C′ l'est également et où, par conséquent, l'erreur provenant du mode de correction doit être beaucoup exagérée. Nous choisirons l'expérience (3 XI,1). Elle était faite avec un mélange très peu différent de celui de l'expérience (1 VII,1); il contenait, en effet, $1^v,37$ de CO^2 au lieu de $1^v,40$ pour 1^v de mélange tonnant CO + O. Mais, par suite d'un accident peu rare dans des mélanges à propagation lente et qui nous a d'ailleurs fait rejeter cette observation, la propagation a duré un temps considérable, qui n'a pas été moindre de 15 vibrations. La durée D_r, calculée avec soin par le procédé des différences secondes exposé plus haut, s'est trouvée égale à $10^v,50$.

La quantité $10^5.d\cdot\frac{1}{\varpi - \varpi_0} = 14,9.$

On calcule ainsi les nombres suivants :

	$\varpi - \varpi_0$	$\frac{1}{\varpi - \varpi_0} \cdot 10^5.$
$5^v,25$	533	187
	376	266
$5^v,25$ 0,5	290	345

On a donc

$$C = 86$$
$$C' = 157,$$

d'où l'on déduit

$$\Pi - \varpi_0 = 290 + \frac{86 + 157}{2} = 411.$$

Ce nombre diffère de 36 de celui qui se rapporte à l'expérience (1 VII, 1). Mais les deux expériences n'ont été faites ni à la même température, ni à la même pression initiale. Le gaz de (1 VII, 1) était à la température de 18° avec $\varpi_0 = 61,5$; celui de (3 XI,1) à celle de 12° avec $\varpi_0 = 64$.

Pour comparer les expériences entre elles, il faut comparer les températures de combustion T données par chacune d'elles. On trouve ainsi

1 VII, 1. . . T = 1760
3 XI, 1. . . T = 1820.

La différence n'est que de 60° (soit 1/30 de la valeur); elle est précisément en faveur de l'expérience qui doit donner une température un peu plus forte, puisqu'elle correspond à un mélange un peu moins chargé d'acide carbonique. L'accord est d'autant plus satisfaisant que, pour l'expérience (3 XI, 1), la correction est énorme ainsi que la différence entre C et C'.

Il est d'ailleurs très important de remarquer que notre mode de correction donne une température un peu trop forte lorsque la correction a une grande valeur. Cela indique que la correction adoptée est un peu trop considérable et que, par conséquent, nos *pressions ou nos températures sont approchées par excès.*

Pressions finales rapportées à un mélange initial de température 0°, dont la pression est prise pour unité. — Les valeurs de Π obtenues pour les différents mélanges ne sont pas immédiatement comparables entre elles, car ces mélanges n'ont, avant la combustion, ni même température absolue τ_0 ni même pression h.

Nous comparerons donc entre eux les rapports de Π à la pression initiale h. Pour tenir jusqu'à un certain point compte de la température initiale absolue τ_0, nous rempla-

cerons en outre la pression initiale h par la pression $h\frac{273}{\tau_0}$ qui aurait été, dans le cylindre, celle du mélange initial, si on l'avait ramené à la température zéro. Nous calculerons, pour chaque observation, le rapport $\frac{\Pi}{h}\cdot\frac{\tau_0}{273}$, que nous appellerons Π_0.

Calcul donnant la température de combustion. — Lorsqu'on a obtenu Π, et que le gaz ne subit pas de dissociation pendant la combustion, la température absolue τ de combustion se calcule par la formule très simple

$$\tau - \tau_0 = \frac{\Pi - \varpi_0}{\tau_0}.$$

On a ensuite la température vulgaire T de combustion par la formule

$$T = \tau - 273 = (\tau - \tau_0) + (\tau_0 - 273).$$

Lorsqu'il y a dissociation, la température de combustion ne peut être calculée que si l'on connaît la valeur des chaleurs spécifiques des gaz à la température T ; à moins que la combustion ne fasse subir aucune contraction au mélange gazeux.

RÉSULTATS DONNÉS PAR L'OBSERVATION.

Dans les tableaux qui suivent, on a fait figurer, pour chaque mélange gazeux expérimenté :

1° La composition avant la combustion;

2° La pression initiale h;

3° La pression ϖ_0 qu'aurait le gaz brûlé si on le faisait refroidir à τ_0 sans lui permettre de se condenser;

4° Le cas échéant, la pression réelle p_0 du gaz brûlé après refroidissement et condensation;

5° La durée totale D_p de la propagation et la durée D_r de la propagation avec refroidissement exprimées en vibrations du manomètre;

6° La pression maxima $\varpi_{0,5}$ réellement exercée dans le cylindre;

7° La pression Π qui se serait produite après la combustion s'il n'y avait pas eu de refroidissement pendant la propagation de la combustion;

8° Le rapport $\Pi_0 = \frac{\Pi}{h} \cdot \frac{\tau_0}{273}$;

9° La température de combustion T déduite des données précédentes, lorsqu'on peut l'obtenir.

I. — Mélanges combustibles formés avec l'oxyde de carbone.

1° *Mélange tonnant* CO + O.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES GAZEUX ajoutés à 1 volume de (CO + O)	h	ϖ_0 calculé.	ϖ_0 observé.	θ_0	p_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,5}$	Π	$\frac{\Pi}{h}\frac{\tau_0}{273}$	T
1	30 VI, 2	Vap. 0,012	76	51	51	10°	»	0v,37	0,15	705	731	9,95	»
2	4 XI, 2	Vap. 0,014	73,2	49,1	50,2	12	»	0 ,52	0,21	647	677	9,68	»
3	13 VII, 2	CO 0,04 Vap. 0,05	40,7	28,5	28,3	21	»	0 ,37	0,15	311	338	8,95	»
4	5 XI, 1	CO 0,013 Vap. 0,006	19,3	14,2	12,7	12	»	0 ,13	0,0	150	157	8,49	»

La pression finale Π ne reste pas constante lorsque la pression initiale varie. Cet effet provient de ce que, comme nous l'avons déjà indiqué plus haut, la dissociation augmente quand la densité du gaz diminue. Nous avons déjà fait remarquer, au reste, que lorsqu'il y a dissociation, notre procédé d'expérimentation ne donne pour Π que des valeurs un peu incertaines.

L'erreur probable n'est cependant pas très considérable ici, car la correction faite pour passer de $\varpi_{9,5}$ à Π n'ex-

cède pas 5 p. 100 de Π, et l'erreur commise ne peut être qu'une fraction de cette correction.

2° *Mélanges* 1^v $(CO+O)+pCO^2$.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 volume de (CO + O)	h	ϖ_0 calculé.	ϖ_0 observé.	θ_0	p_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,5}$	Π	$\frac{\Pi}{h} \frac{\tau_0}{273}$	T
1	13 VII, 3	CO^2 0,091 Vap. 0,03	74,7	52,3	53,1	22°	»	0^v,51	0,20	600	626	9,06	Dissociation
2	8 V, 2	CO^2 0,479 Vap. 0,016	77,1	60	61	14	»	1,30	0,52	577	601	8,18	Dissociation
3	6 V, 1	CO^2 0,92 Vap. 0,027	75,9	62,9	63	16	»	4,12	1,65	491	514	7,18	2050°
4	27 VI, 6	CO^2 0,96 Vap. 0,04	74	61,7	61,9	20	»	3,94	1,58	462	485	7,04	1980°
5	1 VII, 3	CO^2 0,96 Vap. 0,042	72	60	60,2	18	»	4,36	1,90	452	479	7,07	2010°
6	8 V, 1	CO^2 0,98 Vap. 0,02	40,2	33,4	33,8	14	»	2,55	1,02	246	259	6,79	1930°
7	4 XI, 1	CO^2 1,05 Vap. 0,026 CO 0,005	73	61,4	61,6	11	»	8	4	431	478	6,82	1920°
8	1 VII, 2	CO^2 1,135	65,5	55,5	55,5	18	»	4,61	2,5	391	423	6,86	1900°
9	1 VII, 1	CO^2 1,30 Vap. 0,05	71,5	61,5	62	18	»	7,75	4,5	384	437	6,53	1760°
10	8 V, 3	CO^2 1,46 Vap. 0,04	77,1	66,8	67,1	14		12	7,5	370	449	6,12	1640°

Les expériences 1 et 2 accusent une dissociation. Les expériences 4 à 10 en sont certainement exemptes. Elles ont donc une grande importance, parce qu'on peut déduire immédiatement de chacune d'elles la température de combustion correspondante.

Nous avons multiplié les expériences sur les mélanges tenant environ 1^v CO^2 pour 1^v $(CO+O)$. Pour ces mélanges, en effet, la propagation étant relativement assez rapide, la correction à faire pour passer de $\varpi_{0,1}$ à Π, correction qui laisse toujours quelque incertude, n'est pas très considérable. Les résultats sont d'ailleurs très com-

parables entre eux, comme on peut le voir en jetant les yeux sur la courbe *fig.* 5, Pl. XVI, dans laquelle les abscisses sont les volumes d'acide carbonique compris dans 1 volume total de mélange gazeux.

L'expérience 6 est intéressante parce que, comparée à l'expér. 5, elle montre que la température finale reste la même lorsque la pression initiale diminue. Nous verrons d'ailleurs ce fait très important confirmé par de nombreuses expériences. Il démontre que la chaleur spécifique des gaz est indépendante de la pression.

3° *Mélanges* ^{v}(CO + O) + pCO

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 vol. de CO + O	h	ϖ_0 calculé.	ϖ_0 observé.	θ_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,5}$	Π	$\frac{\Pi}{h}\cdot\frac{\tau_0}{273}$	T
1	28 X, 1	CO 0,512 Vap. 0,021	73,1	57,2	58,7	11°	0,37	0,15	635	665	9,5	Dissociation à 1770°
2	1 VII, 5	CO 0,565 Vap. 0,03 CO^2 0,015	70,6	56,0	57,9	18	0,30	0,12	588	629	9,51	Dissociation à 1790°
3	1 VII, 4	CO 0,635 Vap. 0,04	70,0	56,0	58,0	18	0,30	0,12	580	626	9,54	Dissociation à 1790°
4	28 X, 2	CO 1,93 Vap. 0,04	73,0	64,8	65,6	12	1,10	0,44	509	519	7,40	1980°

4° *Mélanges* 1^v(CO + O) + pO.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 vol. (CO + O)	h	ϖ_0 observé.	ϖ_0 calculé.	θ_0	p_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,5}$	Π	$\Pi\frac{\tau_0}{273}$	T
5	1 VII, 7	O 0,305 Vap. 0,03	70,3	52,8	53,0	18°	»	0^v,33	0,13	583	613	9,30	Dissociation
6	27 X, 1	O 0,492 Vap. 0,02	73,1	57,0	58,8	12°	»	0,53	0,21	619	657	9,36	Id.
7	1 VII, 6	O 1,17 Vap. 0,05	70,0	59,5	59,8	18°	»	0,38	0,35	520	556	8,49	Id.
8	27 X, 2	O 1,99 Vap. 0,04	73,1	65,0	65,8	12°	»	4,2	2^v	467	504	7,20	1920°

5° *Mélanges* $1CO + O + p$ Air.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 volume (CO+O)	h	ϖ_0 calculé.	ϖ_0 observé.	θ_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,8}$	Π	$\frac{\Pi}{h}\cdot\frac{\tau_0}{273}$	T
9	23 VI, 3	Az 1,27 Vap. 0,05	76,4	65,4	65,6	18°	1,03	0,41	552	615	8.6	Dissociation
10	26 X, 4	Az 1,58 } O 0,09 } 1,67 Vap. 0,04	73,1	64,0	64,1	12	2,10	0,84	532	588	8,38	Dissociation
11	26 X, 2	Az 1,86 } O 0,15 } 2,01 Vap. 0,04	73,1	65,2	65,0	12	4,14	2,08	483	519	7,50	1980°
12	26 X, 1	Az 1,66 } O 0,38 } 2,04 Vap. 0,04	73,2	65,3	66,0	12	4,60	2,10	469	505	7,21	1930°
13	23 VI, 4	Az 2,46 Vap. 0,04	76,4	69,1	69,3	18	4,3	2,15	456	492	6,87	1760°
14	23 VI, 2	Az 2,38 } O 0,29 } 2,67 Vap. 0,07	76,4	69,6	70,0	18	7,5	4,10	422	477	6,64	1670°

En comparant les expériences 1 et 6 qui contiennent à peu près la même proportion, l'une d'oxyde de carbone et l'autre d'oxygène, et qui montrent une dissociation très nette, on voit que la pression finale est sensiblement la même.

Il est plus intéressant de comparer entre elles les expériences 4, 8, 11 et 12, contenant pour 1v de mélange tonnant, 2v environ d'un gaz étranger qui est, soit de l'oxyde de carbone, soit de l'oxygène, soit de l'azote. La température finale est très sensiblement la même et égale à 1950° environ. Les différences, qui n'atteignent que 30°, sont de l'ordre des erreurs d'expériences. Ce résultat est fort important, car il montre que *les chaleurs spécifiques de ces trois gaz, qui sont égales entre elles aux températures ordinaires, le sont encore vers 2000°.*

II. — Mélanges formés avec le cyanogène.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 volume de C^2Az^2	k	ϖ_0 calculé.	ϖ_0 observé.	θ_0	D_p	D_r	$\mathfrak{H}_{0,5}$	Π	$\frac{\Pi}{k}\frac{\tau_0}{273}$	T
1	7 XII, 1	O 1^v Vap. 0,10	20,1	29,7	32,0	12°	0	0	363	466	16,35	4190°
2	14 VII, 3	O 1,95 Az 7,33 Vap. 0,33	73,1	73,1	73,0	24	2,5	1,22	672	706	10,50	Dissociation de CO^2
3	4 XI, 3	O 1,01 Az 3,80 Vap. 0,09	63,2	73,9	72,9	12	2,75	1,20	686	725	11,95	2500°
4	14 VII, 1	O 1,08 Az 3,68 Vap. 0,10	68,5	79,5	?	24	2,80	1,24	696	747	11,87	2480°

L'expérience 1 a été faite avec la proportion d'oxygène calculée théoriquement pour brûler le cyanogène à l'état d'oxyde de carbone. On a été obligé de diminuer beaucoup la pression initiale pour que la pression finale ne dépasse pas la course possible de notre manomètre. Les résultats sont un peu incertains à cause de la très considérable correction qu'il a fallu faire; le refroidissement est en effet extrêmement rapide dans les premiers instants, par suite de l'énorme température développée. Nous avons dit plus haut que le gaz provenant de cette expérience contenait une proportion très grande d'un gaz absorbable par la potasse, probablement de l'acide carbonique.

L'expérience 2, faite avec une quantité d'air calculée pour brûler le cyanogène à l'état d'acide carbonique, a montré une dissociation se terminant vers 1.800°. Les expériences 3 et 4 se rapportent au mélange de cyanogène et d'air calculé pour brûler théoriquement le cyanogène à l'état d'oxyde de carbone; elles sont très concordantes et méritent confiance.

Nous n'avons pu mesurer la dilatation produite par la

combustion (après refroidissement) dans l'expérience 4; mais nous l'avons mesurée pour l'expérience 3 et obtenu presque exactement le chiffre théorique. La proportion d'acide carbonique formée devait donc être faible; au moyen de l'absorption par la potasse nous ne l'avons pas trouvée, en effet, supérieure à 4 p. 100.

III. — Mélanges dans lesquels l'hydrogène est l'élément comburant.

Fig. 6, Pl. XVI.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 volume de ($H^2 + O$)	h	ϖ_0	p_0	θ_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,5}$	Π	$\frac{\Pi}{h} \frac{\tau_0}{273}$	T
		1° *Mélanges tonnant.* — $H^2 + O$.										
1	29 VI, 4	Vap. 0,03	74,2	50,0	2,4	24°	0 [1]	0	559	619	8,9	3360°
2	12 VII, 1	O 0,01 Vap. 0,03	74,4	49,7	3,3	24	0	0	561	620	9,04	3380
3	2 XI, 1	Vap. 0,01	72,8	48,8	0,8	9	0	0	553	625	8,85	3320
4	11 XI, 1	Vap. 0,019	39,8	26,9	1,1	13	0	0	287	334	8,07	3240
5	15 XI, 3	Vap. 0,045	23,3	14,8	1,1	13	0	0	148	182	8,13	3210
		2° *Mélanges en proportions variables.* — $1^v(H^2+O)+p(H, O, Az)$.										
6	29 XI, 5	O 0,49 Vap. 0,02	73,1	56,5	24,6	12	0	0	545	623	8,86	2830
7	29 XI, 3	H 0,51 Vap. 0,02	73,1	57,2	25,4	12	0	0	»	617	8,81	2800
8	17 VII, 3	O 0,97 Vap. 0,06	73,0	61,0	37,0	23	0	0	482	561	8,30	2430
9	29 XI, 7	O 0,99 Vap. 0,03	73,1	61,1	37,0	12	0	0	462	589	8,40	2460
10	12 VII, 2	H 0,96 Vap. 0,06	74,0	61,8	37,4	24	0	0	497	580	8,49	2460
11	29 X, 2	O 2,00 Vap. 0,02	73,0	65,0	49,0	12	0,16	0,08	459	516	7,39	1970
12	18 VI, 2	O 0,19 } Az 1,75 } 1,94 Vap. 0,06	75,7	68,0	49,0	18	0,50	0,20	461	526	7,40	1950
13	24 X, 3	H 0,75 } Az 1,25 } 2,00 Vap. 0,04	73,2	65,2	48,0	12	0	0	448	512	7,30	1950
14	24 X, 2	Az 1,85 } O 0,15 } 2,00 Vap. 0,04	73,2	65,1	49,0	12	0,25	0,10	468	514	7,34	1960
15	26 X, 1	Az 1,93 } O 0,17 } 2,10 Vap. 0,05	58,6	52,4	40,5	12	0,28	0,11	370	409	7,28	1930
16	26 X, 2	Az 1,90 } O 0,17 } 2,07 Vap. 0,06	38,4	34,1	26,3	12	0,30	0,12	242	280	7,62	2040

[1] Le chiffre 0 ne veut pas dire que la durée de la propagation est rigoureusement nulle, mais seulement qu'elle est assez petite pour qu'on n'en puisse pas apprécier la valeur.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 volume de $(H^2 + O)$	h	ϖ_0	p_0	θ_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,5}$	Π	$\frac{\Pi}{h}\frac{\tau_0}{283}$	T
17	26 X, 3	Az 1,89 } 2,05 O 0,16 } Vap. 0,16	19,7	17,7	13,5	12°	0,60	0,24	125	143	7,58	2000°
18	19 VI, 1	Az 2,05 } 2,27 O 0,22 } Vap. 0,07	75,6	68,0	52,8	18	0,43	0,16	438	485	6,83	1770
19	17 VI, 4	Az 2,09 } 2,37 O 0,28 } Vap. 0,07	76,0	68,5	53,5	18	0,40	0,16	436	476	6,67	1720
20	25 X, 4	Az 2,63 } 3,00 O 0,37 } Vap. 0,06	72,8	67,2	54,8	13	0,50	0,20	415	433	6,20	1540
21	25 X, 1	H 1,76 } 3,04 Az 1,28 } Vap. 0,06	73,2	67,5	55,5	13	0,23	0,09	405	446	6,36	1580
22	24 X, 7	Az 2,91 } 3,36 O 0,45 } Vap. 0,06	73,0	67,5	56,5	12	0,90	0,36	404	429	6,13	1510
23	24 X, 6	H 2,28 } 3,53 Az 1,25 } Vap. 0,06	73,1	67,7	56,9	13	0,30	0,12	382	420	6,00	1470
24	25 X, 3	Az 3,35 } 3,90 O 0,55 } Vap. 0,07	73,2	68,0	58,5	12	1,05	0,42	363	382	5,45	1300
25	25 X, 4	H 2,84 } 4,17 Az 1,33 } Vap. 0,07	73,3	68,2	59,3	12	0,50	0,20	354	377	5,37	1280
		3° *Hydrogène, oxygène et acide carbonique.*										
27	27 X, 3	(CO+O) 1,00 O 0,03 Vap. 0,01	73,3	49,3	25,3	12°	0	0	644	706	10,05	Dissociation de CO²
28	29 X, 6	CO² 0,67 Vap. 0,04	61,0	49,1	25,1	12	0,13	0,04	384	441	7,03	2100
29	2 XI, 2	CO² 1,52 Vap. 0,04	72,8	63,3	44,3	12	1,10	0,44	399	408	5,85	1540
30	8 XII, 1	CO² 2,07 Vap. 040,	76,0	67,7	51,6	10	3,97	2,18	359	377	5,15	1280

Les expériences 1, 2 et 3 faites avec le mélange tonnant

$H^2 + O$, et à la pression initiale de 73^{mm} à 74^{mm}, sont très concordantes. Elles donnent une pression finale de 9 environ. La température serait de 5350° si l'on admettait qu'il n'y a pas de dissociation. Mais la correction considérable qu'il faut faire pour passer de $\varpi_{0,8}$ à Π rend cette conclusion incertaine, car il pourrait se faire que la dissociation eût lieu dans cet intervalle, pendant lequel nous n'observons pas directement les phénomènes qui se passent dans le cylindre. On peut seulement affirmer que la dissociation, s'il y en a une, ne peut être que faible.

Les expériences 4 et 5, faites avec le même mélange tonnant, mais avec des pressions initiales beaucoup plus faibles, donnent une température un peu plus basse, égale à 3230° environ. La différence, qui est de 120°, ne représente cependant qu'une erreur relative de 3,5 p. 100, et nous la croyons compatible avec l'exactitude de nos observations, d'autant plus que l'incertitude de nos résultats devient plus grande quand la pression initiale diminue, puisque les erreurs sont alors multipliées par le rapport inverse des pressions initiales; dans l'expérience 5, la pression n'est pas le tiers de celle de l'experience 1, les erreurs commises ont donc, sur le résultat, une influence trois fois plus grande.

Les nombreuses expériences faites sur des mélanges dans lesquels on avait ajouté Az, O, H, sont particulièrement intéressantes, surtout à cause de l'absence certaine de dissociation pour les mélanges qui ne donnent qu'une température peu élevée, et du peu d'importance de cette dissociation, le cas échéant, pour les autres. On a groupé ensemble les expériences qui ne diffèrent que par la nature du gaz simple ajouté et qui sont à peu près identiques quant à la proportion de ce gaz. On voit que pour chaque groupe les températures de combustion sont presque rigoureusement égales. Les écarts ne dépassent pas 30° à 40° et sont certainement de l'ordre des erreurs probables.

On voit ainsi se confirmer ce fait important, déjà signalé

par la combustion de l'oxyde de carbone, que les chaleurs spécifiques des gaz parfaits restent égales entre elles à des températures très élevées, qui dépassent ici 2800°.

La courbe *fig.* 6, Pl XVI, dans laquelle les abscisses sont les proportions de gaz étrangers contenus dans 1 volume total de mélange, montre d'ailleurs que toutes les observations se relient bien entre elles.

Nous appellerons spécialement l'attention sur les expériences 11 à 17, faites avec un mélange sensiblement identique, contenant 2ᵛ de gaz pour 1ᵛ de mélange tonnant, mais avec des pressions initiales variant de 73,2 à 19,2, soit de 1 à $\frac{2}{3,9}$. La température de combustion est, en moyenne, de 1900° environ, et l'écart maximum des observations est seulement de 60° pour l'expérience 16, soit de 3 p. 100. Il est donc bien démontré que les variations de pression n'influent pas sur la température finale. Au moins l'influence, s'il y en a une, est très faible, et de l'ordre des erreurs d'observation.

En comparant, avec les expériences dans lesquelles le gaz ajouté au mélange tonnant est un gaz simple, celles dans lesquelles le gaz ajouté est de l'acide carbonique, on voit immédiatement la différence considérable qui existe entre ces gaz et les gaz simples. Dans l'expérience 30, on a ajouté au gaz tonnant 2ᵛ d'acide carbonique; la température de combustion est seulement de 1280°. Un mélange contenant 2ᵛ d'un gaz simple donne une température de 1980° environ. L'acide carbonique a donc, aux températures élevées, une chaleur spécifique beaucoup plus grande que celle des gaz simples.

IV. — Chlore et hydrogène.

Fig. 1, Pl. XVII.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 vol. de Cl+H	h	ϖ calculé.	p_0 calculé.	p_0 observé.	θ_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,5}$	Π	$\frac{\Pi}{h} \cdot \frac{\tau_0}{273}$	T
1	7 XII, 1	H 0,03 Vap. 0,02	43,4	43,4	2,1	0,0	8°	0,0	0,0	336	420	10,00	2430°
2	23 XII, 3	Cl 0,33 Vap. 0,02	72,7	72,7	18,5	0,0	8	0,0	0,0	460	495	7,00	1620°
3	22 XII, 1	H 1,20 Vap. 0,03	67,0	67,0	37,0	37,8	9	0,37	0,15	406	471	7,28	1690°
4	22 XII, 1	H 1,32 Vap. 0,03	74,4	74,4	32,0	34,0	9	0,55	0,22	417	478	6,63	1520°

Les expériences faites avec des mélanges de chlore et d'hydrogène ont été un peu difficiles, en raison de la rapidité avec laquelle le chlore était absorbé par l'eau qui garnissait le fond du cylindre. Les lectures pour le dosage des gaz mélangés étaient par suite un peu incertaines. Nous n'avons fait ces expériences qu'après toutes les autres, pour ne pas risquer de mettre, avant le temps, notre appareil hors d'usage. La même raison nous a empêchés de les multiplier autant qu'il eût été désirable en raison de l'intérêt exceptionnel qu'elles présentent.

Nous avons déjà dit que le mélange tonnant Cl + H ne montre pas de dissociation apparente. Il est cependant très vraisemblable, comme nous le verrons, qu'il s'en produit une pendant la durée de la première vibration, qui échappe à nos moyens d'observation.

V. — **Mélanges formés avec** CH^4 (*formène ou grisou*).

Fig. 2, Pl. XVII.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 volume de CH^4	h	CONTRACTION observée rapportée à 1 volume.	p_0 observé.	θ_0	D_p	D_r	$\varpi_{0,5}$	Π	$\frac{\Pi}{h}\frac{\tau_0}{273}$	T
1	13 VII, 1	O 1,84 Vap. 0,17	40,4	1,53	19,9	24°	0	0	487	575	15,15	»
		Grisou et air.										
2	11 VI, 4	O 2,81 Az 10,55 Vap. 0,25	76,0	1,86	66,3	15	5,60	2,30	470	519	6,96	1660°
3	11 VI, 3	O 2,37 Az 8,90 Vap. 0,21	76,0	1,77	65,8	15	4,04	2,05	541	601	8,33	1870
4	11 VI, 9	O 2,03 Az 7,65 Vap. 0,19	76,0	1,86	63,0	15	1,96	0,98	608	646	8,93	2150
5	2 VII, 3	O 1,92 Az 7,24 Vap. 0,32	74,4	1,82	61,5	24	1,83	1,10	598	639	9,34	2150
6	11 III, 1	O 1,87 Az 7,13 Vap. 0,14	76,0	1,74	63,0	12	1,48	0,84	624	660	9,07	»
7	11 VI, 2	O 1,84 Az 6,90 Vap. 0,17	76,0	1,67	63,3	15	1,85	1,30	605	657	9,07	2100
8	11 VI, 8	O 1,72 Az 6,50 Vap. 0,16	76,0	1,43	64,4	15	2,02	1,00	613	653	9,01	»
9	11 VI, 5	O 1,62 Az 6,16 Vap. 0,15	76,0	1,23	65,5	15	2,45	1,79	573	635	8,77	»
10	11 VI, 6	O 1,44 Az 5,41 Vap. 0,14	76,0	0,86	67,8	15	4,22	2,20	540	611	8,43	«

Comme nous l'avons déjà dit plus haut, les mélanges formés par le gaz que nous avons préparé en suivant scrupuleusement le procédé indiqué comme le meilleur ne donnent pas, après la combustion et le refroidissement, des contractions de volume très conformes à la théorie. Cepen-

dant, pour les expériences 1, 2, 3, 4 et 5, les différences ne sont pas assez grandes pour qu'on ne puisse calculer T avec assez d'exactitude au moyen de la formule ordinaire. Les mélanges de ces expériences sont formés avec excès d'oxygène et doivent par conséquent donner comme produits de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau sans contraction de volume, de sorte que l'on a $\varpi_0 = h$.

IV. Chaleurs spécifiques des gaz.

1° CHALEURS SPÉCIFIQUES DES GAZ POUR DES TEMPÉRATURES PEU DIFFÉRENTES DE LA TEMPÉRATURE ORDINAIRE.

Le but principal de nos expériences était de chercher ce que deviennent, aux températures élevées, les chaleurs spécifiques des gaz. La connaissance de cette donnée importante, outre l'intérêt théorique qu'elle présente en elle-même permet, lorsqu'on y joint celle des chaleurs de combustion, de calculer la température de combustion d'un mélange gazeux quelconque.

Principes généraux. — Nous allons d'abord récapituler les données scientifiques connues au sujet des chaleurs spécifiques des gaz.

On distingue, dans un corps, la chaleur spécifique vraie C_t et la chaleur spécifique *moyenne* $C_{t,t'}$ entre deux températures t et t'.

On a par définition

$$q = C_{0,t} \times t$$

Q étant la quantité de chaleur nécessaire pour élever 1 gramme du corps de o à t.

Si l'on prend la dérivée des deux membres de cette

expression, on a

$$\frac{dq}{dt} = \frac{dC_{0,t}}{dt} t + C_{0,t}.$$

La quantité $\frac{dq}{dt}$ est sensiblement la quantité de chaleur nécessaire pour élever le corps de t à $t + 1$; c'est ce qu'on appelle la chaleur spécifique *vraie* C_t. Si l'on a

$$C_{0,t} = C_0 (1 + rt)$$

C_0 étant la chaleur spécifique vraie à 0°, on aura

$$C_t = C_0 (1 + 2 rt),$$

d'où l'on voit que l'accroissement qu'éprouve la chaleur spécifique vraie pour un accroissement donné de température est le double de celui qu'éprouve la chaleur spécifique moyenne.

On distingue en outre dans les gaz la chaleur spécifique à pression constante et la chaleur spécifique à volume constant. Ces deux chaleurs spécifiques diffèrent entre elles de la quantité de chaleur qu'absorbe le travail de dilatation, accompagnant, dans un échauffement à pression constante, l'accroissement de température de 1°.

Si p est la pression constante, v le volume du gaz, α le coefficient de dilatation du gaz, E l'équivalent mécanique; αv est l'accroissement de volume pour un accroissement de 1°; $p\alpha v$ le travail de la dilatation, et l'on a, C_p et C_v étant les deux espèces de chaleurs spécifiques correspondant au poids du gaz dont le volume est v,

$$C_p = C_v + \frac{1}{E} p \alpha v.$$

Nous rapporterons les chaleurs spécifiques du gaz, non pas au poids de 1 gramme, mais au poids moléculaire, c'est-à-dire, si l'on veut éviter toute idée théorique, au poids du gaz qui occupe un volume égal à $22^{lit},32$.

Ce volume est celui qu'occuperaient à 0° et 760mm 2 grammes d'hydrogène.

Le travail de la dilatation de ce volume, lorsque la pression est de 760mm et la température de 0°, est

$$\alpha p v = \frac{10.330}{273} \times 22,3,$$

et la quantité de chaleur correspondante est

$$\frac{10.330 \times 22,3}{273 \times 43,0} = 1,964.$$

Si nous représentons par C_p et C_v les chaleurs *moléculaires* spécifiques, on aura donc pour tous les gaz

$$C_p = C_v + 1,964.$$

L'expérience confirme en effet l'exactitude presque complète de cette équation pour les gaz dont on a pu mesurer directement les deux chaleurs spécifiques C_p et C_v.

Il est vrai que ces vérifications ne peuvent se faire que pour des températures peu différentes de la température ordinaire. Mais l'équation serait rigoureusement exacte si, pendant la dilatation ou la contraction, il n'y avait pas de travail intérieur produit dans le gaz, et c'est ce qui aurait lieu si ce gaz suivait rigoureusement les lois de Mariotte et de Gay-Lussac. Admettre aux hautes températures l'équation posée entre C_p et C_v, c'est donc admettre qu'à ces températures les lois précitées s'appliquent, sinon mieux, tout au moins aussi bien, qu'aux températures ordinaires. C'est ce que nous avons, en effet, les plus fortes raisons de croire.

Chaleurs spécifiques des gaz parfaits. — On sait que les chaleurs moléculaires présentent ce caractère important d'avoir presque rigoureusement la même valeur, aux températures ordinaires, pour tous les gaz, dits *parfaits*

parce qu'ils suivent mieux que les autres, à la température ordinaire, les lois de Mariotte et de Gay-Lussac.

	Poids moléculaire	Chal. sp. moléc.	
	—	à pr. const.	à vol. const.
H^2	2	6,82	4,86
Az^2	28,08	6,84	4,88
O^2	32,0	6,96	5,00
CO	28,0	6,86	4,90
ClH.	36,45	6,75	4,79

M. Moutier, dans un récent travail (*), a déduit de la thermodynamique cette conséquence que si deux corps obéissent à des lois de dilatation et de compression identiques, ils ont nécessairement des chaleurs spécifiques égales entre elles. L'égalité des chaleurs spécifiques des gaz parfaits serait une application de ce principe.

On comprendrait encore ainsi pourquoi cette égalité se conserve aux températures élevées, ainsi que nous l'avons constaté, bien que, comme nous le verrons plus loin, les chaleurs spécifiques de ces gaz ne restent pas rigoureusement constantes avec la température.

Quant aux autres gaz, leurs chaleurs spécifiques moléculaires n'ont plus la même valeur, comme on en jugera par les nombres qui suivent :

	Poids moléculaire	Chal. sp. moléc.	
	—	à pr. const.	à vol. const.
Cl^2	70,91	8,58	6,62
CO^2	44	8,23	6,27
H^2O.	18	7,57 (**)	5,61
Az^2O	44,09	7,42	5,46

Une autre différence, plus importante encore, entre ces deux groupes de corps gazeux, a été constatée, au moins

(*) *Journ. de l'Éc. pol.*, cahier. 1884.

(**) Nous verrons plus loin comment a été calculé ce nombre que ne donne pas l'expérience directe.

pour des températures peu différentes de la température ambiante (0° à 200°), par Regnault.

Les gaz parfaits ont une chaleur spécifique qui ne varie pas ou qui varie très peu avec la température. Pour l'air, par exemple, sur lequel naturellement les expériences ont été plus nombreuses parce qu'elles étaient plus faciles, Regnault a trouvé, que la chaleur spécifique vraie est

entre	— 30° et +	10°	0,23771
	0	100	0,23741
	0	200	0,23731

Les écarts entre les expériences individuelles ne dépassent pas 0.003.

Pour l'hydrogène, on a trouvé

Entre	0° et	200°	3,4090
	0	100	3,3996

Les écarts entre la moyenne et les résultats des expériences individuelles ne dépassent pas 0,02, soit moins de 1,5 p. 100.

M. E. Wiedemann (*) a trouvé, de son côté, des valeurs qui diffèrent à peine de celles de Regnault,

Air	0,2389
Hydrogène	3,3410.

Regnault n'a pas fait d'expériences pour constater l'invariabilité de la chaleur spécifique de CO avec la température. M. Wiedemann a comblé cette lacune et a trouvé

Entre	25° et	100°	0,2425	
	25	200	0,2426	(0,2450 Regn.)

Les écarts les plus grands de ces moyennes avec les résultats individuels ne dépassent pas 0,0019, soit moins de 1 p. 100.

(*) *Pogg. Ann.*, 157, p. 1. 1876.

Il est donc bien établi que la chaleur spécifique des gaz parfaits n'éprouve, entre 100° et 200°, que des variations très petites; toutefois on ne saurait considérer comme absolument démontré que ces variations sont certainement nulles. Le faible écart des résultats obtenus sur la moyenne adoptée ne peut être considérée comme étant la mesure rigoureuse de l'exactitude de l'observation et de la confiance qu'elle mérite. La nullité même de cet écart ne prouverait qu'une chose à la rigueur, c'est que les observations ont toujours été faites dans les mêmes conditions et avec une parfaite habileté. Mais, les causes accidentelles éliminées, il reste les causes systématiques non corrigées que comporte le système même adopté pour l'observation, et Regnault lui-même ne manque pas de le faire remarquer.

Ces considérations ont ici d'autant plus de force que les erreurs systématiques, dans la mesure des quantités de chaleur, tendent toutes à dissiper une certaine partie de la chaleur qu'on veut mesurer, et cela d'autant plus que la température est plus grande. Ces causes d'erreur tendent donc à abaisser la chaleur spécifique des gaz portés à haute température, et par conséquent à dissimuler un léger accroissement de cette chaleur spécifique avec la température.

Nous ne croyons donc pas que, malgré l'autorité de l'illustre observateur, on puisse affirmer que la constance de la chaleur spécifique entre 100° et 200° soit démontrée à plus de 1,5 à 2 p. 100 près.

Quoi qu'il en soit, contrairement ce qui a lieu pour les gaz parfaits, la chaleur spécifique des autres gaz varie beaucoup avec la température. Regnault a constaté et mesuré la variation relativement considérable que subit la chaleur spécifique de l'acide carbonique entre 0° et 200°; il a signalé une variation analogue pour le protoxyde d'azote. Quant à la vapeur d'eau, la variation de sa chaleur spécifique n'a été ni constatée, ni mesurée directement par aucun obser-

vateur. M. Winckelmann l'a seulement déduite d'expériences indirectes.

Nous laisserons de côté le protoxyde d'azote qui n'intervient pas dans nos expériences, mais nous parlerons avec détail de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau.

Chaleur spécifique de l'acide carbonique. — Regnault et M. Wiedemann (*) ont déterminé la chaleur spécifique à pression constante de l'acide carbonique aux températures ordinaires, et ils ont trouvé les résultats suivants pour les chaleurs spécifiques *vraies* rapportées au gramme :

	WIEDEMANN.		REGNAULT.	
	C	Accroissement pour 100°.	C	Accroissement p. 100°.
0°	0,1952		0,1870	
		0,0217		0,0275
100°	0,2169		0,2145	
		0,0218		0,0252
200°	0,2387		0,2397	

Rapportés au poids moléculaire égal à 44 grammes, ces nombres deviennent

	WIEDEMANN.		REGNAULT.	
	C	Accroissement pour 100°.	C	Accroissement pour 100°.
0°	8,590		8,228	
		0,955		1,210
100°	9,545		9,438	
		0,960		1,109
200°	10,505		10,547	

Comme on le voit, les nombres des deux expérimentateurs

(*) *Pogg. Ann.* 157 (1878), p. 1.

sont assez divergents, surtout à la température de 0°, où la différence est de plus de 4 p. 100 de la valeur. A 200°, au contraire, l'accord est satisfaisant. Il en résulte naturellement que la loi d'accroissement n'est pas la même pour les deux auteurs; elle est très notablement plus rapide pour Regnault. De plus, M. Wiedemann trouve une variation sensiblement proportionnelle a la température, tandis que pour Regnault la variation va légèrement en décroissant.

Tout en constatant ce désaccord qui montre que, même aux températures ordinaires, les chaleurs spécifiques du gaz ne sont peut-être pas connues à plus de 3 à 4 p. 100 près, nous adopterons les nombres de Regnault. Pour les comparer à nos expériences, nous transformerons d'abord les chaleurs *vraies* en chaleurs *moyennes* entre 0° et t, ce qui ne changera pas la chaleur à 0° et divisera par 2 l'accroissement relatif à la température.

Nous aurons ainsi

	Chal moléculaire moy. à pression const.	Accr[t].
0°	8,228	
	....	0,605
100	8,833	
	....	0,555
200	9,388	

Il faut encore passer des chaleurs à pressions constantes aux chaleurs à volume constant, ce qui se fera en retranchant 1,964 aux chaleurs moyennes, et ne changeant rien aux accroissements. On trouvera enfin

	Chal. spéc. à volume const.	Accr[t].
0°	6,264	
	....	0,605
100	6,869	
	....	0,555
200	7,424	

On représenterait bien ces nombres par la formule pa-

rabolique

$$C_v = 6{,}26 + 6{,}3.\ t \cdot 10^{-3} - 8{,}5 t^2 \cdot 10^{-6}.$$

Chaleur spécifique de la vapeur d'eau. — A cause des difficultés particulières d'expérimentation, il s'en faut que l'on possède sur la chaleur spécifique de la vapeur d'eau des données aussi complètes que sur celle de l'acide carbonique.

Regnault a trouvé pour chaleur spécifique moyenne à pression constante, entre 100 et 200°, rapportée au gramme, 0,4776, soit 8,633 rapportée au poids moléculaire 18.

En retranchant $1{,}964 = A\alpha p_0 v_0$, nous aurons

$$C_{100,200} = 6{,}669$$

Nous avons d'ailleurs

$$100 \times C_{100,200} = 200\, C_{0,200} - 100\, C_{0,100}$$

équation dans laquelle les deux membres expriment la quantité de chaleur nécessaire pour porter 1gr de 100° à 200°.

On peut en outre poser, au moins entre 0° et 200°,

$$C_{0,t} = C_0\,(1 + \alpha t)$$

α étant un certain coefficient, et C_0 la chaleur spécique à $t°$.

L'équation précédente devient donc

$$C_{100,200} = \frac{200\, C_0 (1 + 200\,\alpha) - 100\, C_0 (1 + 100\,\alpha)}{100} = C_0\,(1 + 300\,\alpha).$$

On a ainsi

$$C_0\,(1 + 300\,\alpha) = 6{,}69,$$

Les seules expériences d'où l'on puisse déduire la valeur de α, c'est-à-dire la variation de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau, sont celles de M. Winckelmann (*).

(*) Ueber die Wärmeleitung von Gazen und Dämpfen und die Abhängigkeit der specifischen Wärmen derselben von der Temperatur. *Pogg. Ann.*, 159 (1876), p. 177.

Ce savant n'a pas étudié spécialement les chaleurs spécifiques des gaz ; ses expériences avaient pour but de mesurer les coefficients de conductibilité et particulièrement la variation, avec la température, de ces cofficients. Or, d'après les théories de Clausius et Maxwell, si l'on appelle k_t le coefficient de conductibilité à $t°$, C_t la chaleur spécifique vraie à volume constant à t_0, on a

$$\frac{k_t}{k_0} = \frac{C_t}{C_0}.$$

Ayant $\frac{k_t}{k_0}$, on peut donc en déduire $\frac{C_t}{C_0}$.

Pour l'acide carbonique, M. Winckelmann tire de ces expériences.

$$\frac{c_{100}}{c_0} = 1,172$$

et les nombres de Regnault combinés avec les expériences de M. Wüllner (*) sur le rapport, à diverses températures des deux chaleurs spécifiques, donnent $\frac{C'_{100}}{C_0} = 1,173$. L'accord entre la théorie et l'expérience est donc très satisfaisant

M. Winckelmann a donné ainsi pour la vapeur d'eau

$$\frac{C_{100}}{C_0} = 1,127.$$

L'accroissement de la chaleur *vraie* est donc égal à 0,127 pour 100°, et celui relatif à la chaleur *moyenne* étant moitié serait égal à 0,0645. De cette valeur de l'accroisement, on tire

$$C_0 = \frac{6,69}{1,1905} = 5,61.$$

(*) *Wiedem. Ann.*, 4 (1878), p. 7.

2° VALEURS DES CHALEURS SPÉCIFIQUES TIRÉES DE NOS EXPÉRIENCES.

Procédé employé pour le calcul. — Pour déduire de nos expériences les chaleurs spécifiques des gaz aux hautes températures, nous emploierons l'équation suivante.

Soit

Q la chaleur moléculaire de combustion du gaz, c'est-à-dire la quantité de chaleur dégagée par la formation d'une quantité du composé qui a pris naissance, égale à son poids moléculaire;

T la température de combustion, déterminée par nos expériences;

1 le volume moléculaire du gaz formé (la vapeur d'eau par exemple), supposé ramené, sans condensation bien entendu, à 0° et 760mm; ce volume représente une molécule du gaz;

v', v'', les volumes moléculaires, toujours ramenés à 0° et 760mm, des autres gaz mélangés, qui n'entrent pas dans la combinaison, mais sont échauffés par la chaleur que développe la combustion.

La chaleur dégagée dans la combustion est Q, s'il n'y a pas de dissociation, puisque la combustion donne naissance à un volume moléculaire du gaz.

Nous supposons, ce qui ne cause qu'une erreur négligeable, que les gaz étaient à 0° avant la combustion; celle-ci a donc porté de 0° à T, non seulement un volume moléculaire du gaz formé par la combustion, mais en outre v', v'', etc., volumes moléculaires de chacun des autres gaz.

Si donc C est la chaleur spécifique moléculaire moyenne à volume constant du gaz formé entre 0° et T; C', C'', etc., les chaleurs spécifiques moléculaires moyennes des autres gaz, aussi entre 0° et T°, on aura

$$Q = (C' + C'v' + C''v'' + \ldots)T. \qquad (1)$$

formule qui n'est vraie que lorsqu'il n'y a pas de dissociation.

Nos expériences donnent T, v', v'', etc. Les quantités Q sont connues par les nombreux travaux de Favre et Silberman, MM. Berthelot, Thomsen, etc. Nous prendrons dans l'*Annuaire du bureau des Longitudes* les nombres suivants donnés par M. Berthelot, et dont nous ferons usage.

	Poids moléc. du gaz formé.	Chaleur de combinaison rapportée à 1 moléc.
CO^2 (CO + O)	44	+ 68,200
CO^2 ($C + O^2$)	44	+ 94,000
CO (C + O)	28	+ 25,800
H^2O (H^2 + O)	18	+ 58,200
Cl H (Cl + H)	36,5	+ 22,000
C^2Az^2 ($C^2 + Az^2$)	52	— 74,500
CH^4 ($C + H^4$)	16	+ 18,500

Avec les résultats de nos expériences, et les valeurs de Q que nous venons de transcrire, la formule (1) détermine immédiatement C lorsqu'on n'a mis en présence, avant la combustion, que les deux gaz qui doivent se combiner, et justement dans les proportions convenables pour qu'il ne reste aucune fraction sensible non combinée. Dans ce cas en effet v', v'', etc., sont égaux à zéro.

La température élevée T que développe la combustion du mélange tonnant amène souvent une dissociation; c'est, par exemple, comme on l'a vu, le cas du mélange tonnant d'oxyde de carbone et d'oxygène.

Dans ce cas, on peut tourner la difficulté en mélangeant au gaz tonnant, une proportion suffisante du gaz même qu'il produit en brûlant. Si l'on ajoute, par exemple, un volume v' d'acide carbonique au mélange tonnant d'oxyde de carbone et d'oxygène, la formule (1) devient

$$Q = C(1 + v')T,$$

et, connaissant Q, v' et T, on peut calculer C.

C'est ainsi que nous déterminerons la chaleur spécifique de l'acide carbonique.

Égalité des chaleurs spécifiques des gaz parfaits jusqu'à 3000°. — Invariabilité des chaleurs spécifiques avec la pression. — Nous allons maintenant exposer les résultats que l'on peut déduire de nos recherches en ce qui concerne la chaleur spécifique des gaz.

Mais auparavant nous rappellerons que l'examen seul des températures de combustion nous a déjà permis de formuler ces deux lois importantes qui ne sont que le prolongement, à des températures élevées, des lois qui avaient été établies aux températures ordinaires.

1° Les chaleurs spécifiques sont indépendantes de la pression, puisqu'un même mélange gazeux développe, par la combustion, la même température, quelle que soit sa densité initiale C'est ce que montrent les expériences (12 VII, 1), (2 XI, 1), (11 XI, 1), (15 XI, 3) faites avec le mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène ainsi que les expériences (24 X, 3), (26 X, 1), (26 X, 2), (26 X, 3) faites avec un mélange d'hydrogène et d'air.

2° Les chaleurs spécifiques des gaz parfaits, qui sont presque égales entre elles aux températures ordinaires, le sont encore à des températures voisines de 3000°.

a. *Acide carbonique.*

Les expériences 4 à 10 du tableau sont utilisables; nous éliminerons seulement l'expérience 6 qui, faite avec un gaz très peu dense, présente moins de garanties d'exactitude. Nous considérons la chaleur spécifique à volume constant du poids moléculaire 44, qui est supposé occuper l'unité de volume. Si C est cette chaleur spécifique, on a, le volume de l'acide carbonique formé étant pris pour unité

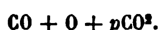
$$Q = (vC + v'C')T$$

v étant le volume de l'acide carbonique total après la combustion, v' celui de la vapeur d'eau, C' étant la chaleur spécique de H^2O. Nous verrons que C' est peu différent de C; comme d'ailleurs v' est petit, on pourra, sans erreur sensible, écrire

$$Q = (v + v')\,CT.$$

Q est, d'après M. Berthelot (*), égal à 68,200.

On obtient ainsi les nombres inscrits dans le tableau ci-joint :



NUMÉROS.	DATES.	$v + v'$.	T	C_{CO^2}
3	6 V, 1	2,42	2050	13,7
4	27 VI, 6	2,50	1980	13,7
5	1 VII, 3	2,49	2010	13,6
6	8 V, 1	2,50	1930	14.1 ?
7	4 XI, 1	2,65	1920	13,4
8	1 VII, 2	2,78	1900	13,0
9	1 VII, 1	3,03	1760	12,8
10	8 V, 3	3,25	1640	12,7

On a vu que les expériences de Regnault indiquent pour l'acide carbonique une variation de la chaleur spécifique dont le taux décroît avec la température, de sorte que cette chaleur spécifique moyenne pourrait être représentée par une expression de la forme

$$C_v = a + bt - ct^2,$$

soit en fait

$$C_v = 6{,}264 + 0{,}63t.10^{-2} - 0{,}025t^2.10^{-4},$$

expression qui donnerait $c_v = 8{,}9$ à 2000°.

Mais il est évident que les expériences ne sont pas assez précises pour que l'on puisse considérer comme connu avec

(*) *Annuaire du Bureau des longitudes.*

quelque approximation le coefficient de t^2. Nous nous contenterons donc de représenter les expériences de Regnault par une formule à deux termes $c_v = a + bt$, dans laquelle $b = 0,580$ sera l'accroissement moyen entre 0° et 200°. Cette formule sera

$$C_v = 6,26 + 0,58\, t.10^{-2}.$$

Les nombres de Wiedemann donneraient

$$C_v = 6,63 + 0,48\, t.10^{-2}.$$

Nos expériences conduiraient, à 2000°, à la valeur moyenne 13,6, ce qui, si l'on se contentait d'une formule à deux termes, se traduirait par

$$C_v = 6,26 + 0,367\, t.10^{-2}.$$

Nous tomberions ainsi sur un coefficient de t notablement inférieur à celui de Regnault. Cette formule donnerait à 200°, $C_v = 6,99$ au lieu de 7,42 nombre expérimental. L'écart qui est de 0,53, soit de 7 p. 100 environ, paraît supérieur aux erreurs possibles.

Pour mettre les expériences d'accord, on peut introduire dans la formule un terme en t^2, ce qui revient à calculer une parabole dont on connaît la tangente à l'origine et un point.

On trouve ainsi sans difficulté (*)

$$C_v = 6,3 + 6,0\, t.10^{-3} - 1,18.\, t^2 10^{-6}. \qquad (1)$$

La courbe en points longs, *fig.* 3, Pl. XVII, représente cette parabole. On y a indiqué les observations contenues dans le tableau précédent et dont nous avons tiré la valeur de la chaleur spécique à 2000°.

Cette formule (1) donnerait un maximum égal à 13,9

(*) Nous avons jadis proposé (C. R., 12 déc. 1881) la formule peu différente

$$c_v = 6,3 + 0,00564\, t - 0,000\,00108\, t^2$$

qui donne 13,2 à 2000.

pour 2540°. En réalité il n'est pas permis de prolonger notre formule empirique au delà des termes entre lesquels elle a été calculée, et nous ne pouvons pas considérer comme déterminées par nos expériences, les chaleurs spécifiques, notablement au-dessus de 2000°.

Rien n'empêche d'ailleurs d'adopter une autre formule empirique pour relier les trois seuls résultats que nous pouvons considérer comme donnés par l'expérience, l'un à 0°, l'autre à 200°, le troisième à 2000°. On peut essayer par exemple la formule

$$C = \alpha\tau^{\beta}$$

τ étant la température absolue.

Cette formule est équivalente à celle-ci :

$$\log C = \log\alpha + \beta\log\tau,$$

qui n'a que deux coefficients indéterminés, au lieu de trois que contient la formule parabolique. Malgré cela, elle s'adapte bien aux nombres expérimentaux.

En partant des données relatives à 0° et 2,000°, et remplaçant pour simplifier, τ par $\tau.10^{-2}$, on trouve

$$\log\alpha = \log 4,33 = 0,636$$
$$\beta = 0,367 = \frac{1}{2,73}$$

et ces coefficients donnent pour 200°, $C = 7,65$ au lieu de 7,42. L'erreur est inférieure à 3 p. 100 et compatible avec les erreurs d'observation.

Notre formule devient alors

$$C_v = 4,33.(\tau.10^{-2})^{0,367}. \qquad (2)$$

Cette formule exponentielle à deux coefficients donne des résultats sensiblement égaux à ceux de la formule parabolique (1) à trois coefficients, entre 0° et 2.000°; mais les résultats vont considérablement en divergeant au delà,

comme on peut s'en assurer par le tableau suivant ou par la *fig.* 3, Pl. XVII, dans laquelle la formule (2) est représentée par la courbe en trait plein.

	Formule (1).	Formule (2).
0°	6,26	6,26
500	9,0	9,1
1000	11,1	11,0
1500	11,6	12,4
2000	13,6	13,6
2500	13,9	14,7
3000	13,6	15,6
3500	12,8	16,4
4000	11,4	17,1

Le coefficient β de la formule (2) n'est pas très éloigné d'être égal à $\frac{1}{3}$. Les nombres de Wiedemann se prêteraient assez bien à l'adoption de ce coefficient très simple. On aurait alors

$$\log \alpha = 0,6755 = \log 4,74$$

$$\beta = \frac{1}{3}$$

Ce qui donnerait

	C_v Calculé.	C_v Observé (Wied).
0°	6,62	6,62
200	7,95	7,59
2000	13,4	13,6

La formule deviendrait très simple et pourrait s'écrire

$$C_v = 4,74 \sqrt[3]{\tau \cdot 10^{-2}}. \qquad (3)$$

Elle ne donnerait lieu qu'à des erreurs inférieures à 5 p. 100.

b. *Vapeur d'eau.*

Nous avons vu que la vapeur d'eau ne montre aucun signe de dissociation, jusqu'à une température voisine de

la température de combustion. Nous pourrons donc admettre que la dissociation est nulle ou négligeable, ce qui nous permettra de calculer la chaleur spécifique de la vapeur d'eau à la température de combustion du mélange tonnant, 3380° environ, en nous servant des expériences, d'ailleurs très concordantes faites avec ce mélange.

Si 1 est le volume d'eau formée par la combustion, v le volume de la vapeur qui saturait le gaz à l'origine, on a

$$C_v(1 + v)\,T = Q.$$

On a au reste Q = 58,200.

Les résultats du calcul sont donnés dans le tableau suivant.

Mélange tonnant ($H^2 + O$).

NUMÉROS.	DATES.	VOLUME GAZEUX mélangés à 1v d'eau H^2O.	T	$\frac{Q}{T}$	C
1	29 VI, 1	Vap. 0,045	3360	17,3	16,5
2	12 VII, 1	O 0,015 Vap. 0,045	3380	17,1	16,2
3	2 XI, 1	Vap. 0,015	3320	17,4	17,1
4	11 XI, 1	Vap. 0,028	3240	17,9	17,4
5	15 XI, 3	Vap. 0,067	3210	18,0	16,8

En éliminant les expériences (4) et (3) qui, faites à faible pression, présentent moins de garanties, nous prendrons pour la valeur de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau, à 3350° le nombre 16,6.

Si nous posons la formule

$$C_v = C_0\,(1 + \alpha t . 10^{-3}),$$

en nous rappelant que $C_0 = 5,61$, on trouvera pour α la valeur 0,585.

Le coefficient d'accroissement de M. Winckelmann est de 0,0585 et donnerait à 3350° 17,5 au lieu de 16,6. La différence n'est pas assez considérable, surtout en raison

de la voie détournée que le savant physicien a suivie, pour qu'il y ait lieu de s'y arrêter. Nous prendrons donc, pour l'expression de la chaleur spécifique moyenne à volume constant de la vapeur d'eau, la formule

$$C_v = 5{,}61(1 + 0{,}585\,t.10^{-3}),$$

ou la formule équivalente (*)

$$C_v = 5{,}61 + 3{,}28\;t.10^{-3}. \qquad (4)$$

Il faut remarquer que la grande différence qu'accuse cette formule, comparée à celle que nous avons trouvée plus haut pour l'acide carbonique, peut trouver son explication dans ce fait important, que la vapeur d'eau ne se dissocie pas sensiblement entre 0° et 3350°, tandis que l'acide carbonique se dissocie déjà vers 1800°.

Nous pouvons nous servir des expériences faites en ajoutant de l'acide carbonique au mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène, pour comparer entre elles les expressions (4) et (2) relatives aux chaleurs spécifiques de la vapeur d'eau et de l'acide carbonique. On trouve ainsi :

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux mélangés à 1 volume d'eau formée H^2O.	T	$\frac{Q}{T}$	CHALEUR spécifique de H^2O déduite de l'expression (4).	CHALEUR spécifique calculée pour CO^2.	CHALEUR spécifique de CO^2 déduite de l'expression (2).
28	29 X, 6	CO^2 1,00 Vap. 0,06	2100	27,7	12,3	14,4	13,8
29	2 XI, 2	CO^2 2,28 Vap. 0,06	1540	37,7	10,6	11,6	12,6
30	8 XII, 2	CO^2 3,11 Vap. 0,06	1280	45,3	9,7	11,3	11,8

(*) La formule parabolique que nous avons donnée dans notre première communication insérée aux Comptes rendus, fournit des valeurs de C peu différentes de celle que donne la formule linéaire ci-dessus.

Les expériences 28 et 30 ne donnent que des erreurs relatives inférieures à 5 p. 100 admissibles pour une vérification semblable dans laquelle toutes les erreurs s'ajoutent. L'expérience 29 donne une erreur un peu forte, de plus de 8 p. 100.

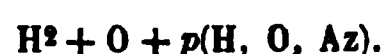
c. *Chaleur spécifique des gaz parfaits.*

Connaissant la chaleur spécifique de la vapeur d'eau et, au moins approximativement, la loi que suivent les variations de cette chaleur spécifique avec la température, nous pouvons nous en servir pour calculer les variations de la chaleur spécifique des gaz simples. Nous utiliserons à cet effet les nombreuses expériences que nous avons faites, dans ce but, en mêlant au gaz tonnant d'hydrogène et d'oxygène des proportions très variables d'hydrogène, d'oxygène et d'azote.

Nous avons déjà reconnu ce fait très important que les chaleurs spécifiques des gaz simples, ainsi que celle de l'oxyde de carbone, sont sensiblement égales entre elles à toute température, comme elles le sont à la température ordinaire. Nous n'aurons donc qu'à chercher pour tous ces gaz, une formule unique qui représente la variation de la chaleur spécifique avec la température.

Le tableau suivant montre les résultats obtenus.

Chaleurs spécifiques de gaz simples.



$H^2 + O + p(H, O, Az)$.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux mélangés à 1 vol. d'eau formée H^2O	TEMPÉRATURE de combustion T	$\frac{Q}{T}$	CHALEUR spécifique de la vapeur d'eau × (1 + r').	CHALEUR spécifique des gaz simples.
6	29 XI, 5	O 0,735 Vap. 0,03	2830	20,4	15,4	6,8
7	29 XI, 3	H 0,764 Vap. 0,03	2800	20,7	15,3	7,06
8	17 VII, 3	O 1,455 Vap. 0,09	2430	23,9	14,8	6,26
9	29 XI, 7	O 1,485 Vap 0,045	2460	23,5	14,3	6,20
10	12 VII, 2	H 1,44 Vap. 0,09	2460	23,5	14,9	6,0
11	29 X, 2	O 3,00 Vap. 0,03	1970	29,4	12 4	5,7
12	18 VI, 2	O 0,285 } Az 2,62 } 2,91 Vap. 0,09	1950	29,7	13,1	5,7
13	24 X, 3	H 1,13 } Az 1,87 } 3,00 Vap. 0,06	1950	29,7	12,7	5,7
14	24 X, 2	Az 2,77 } O 0,23 } 3,00 Vap. 0,06	1960	29,6	12,7	5,6
15	26 X, 1	Az 2,90 } O 0,25 } 3,15	1930	30,0	12,6	5,5
16	26 X, 2	Az 2,85 } O 0,25 } 3,10 Vap. 0,06	2040	28,4	13,0	5,6
17	26 X, 3	Az 2,83 } O 0,24 } 3,07 Vap. 0,24	2000	29,0	12,8	5,3
18	19 VI, 1	Az 3,07 } O 0,33 } 3,40 Vap. 0,10	1770	32,9	12,5	6,0
19	17 VI, 4	Az 3,14 } O 0,41 } 3,55 Vap. 0,10	1720	33,6	12,4	6,0
20	25 X, 4	Az 3,95 } O 0,55 } 4,50 Vap. 0,09	1540	37,6	11,6	5,8

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES gazeux mélangés à 1 vol. d'eau formée H^2O	TEMPÉRATURE de combustion T	$\frac{Q}{T}$	CHALEUR spécifique de la vapeur d'eau × (1 + v').	CHALEUR spécifique des gaz simples.
21	25 X, 1	H 2,64 / Az 1,92 } 4,56 Vap. 0,09	1580	36,7	11,8	5,5
22	24 X, 7	Az 4,38 / O 0,66 } 5,04 Vap. 0,09	1510	38,4	11,6	5,3
23	24 X, 6	H 3,43 / Az 1,87 } 5,30 Vap. 0,09	1470	39,4	11,4	5,3
24	25 X, 3	Az 5,01 / O 0,83 } 5,84 Vap. 0,10	1300	44,5	10,7	5,8
25	25 X, 4	H 4,26 / Az 2,99 } 6,25 Vap. 0,10	1280	45,2	10,6	5,5

Les nombres de la dernière colonne de ce tableau ont été portés sur la *fig.* 3, Pl. XVII, en prenant pour abscisses les températures et pour ordonnées les chaleurs spécifiques. Comme on devait s'y attendre d'après la manière dont ils ont été obtenus, les chiffres obtenus ne sont pas très concordants. Ils accusent cependant une augmentation très nette de la chaleur spécifique des gaz simples avec la température. Le résultat est donc d'accord sur ce point, avec celui que nous avions déduit de nos premières mesures. Toutefois le taux même de cet accroissement paraît plus faible que celui que nous avions indiqué autrefois; nous avions en effet (*) admis pour la chaleur spécifique des gaz parfaits, le chiffre de 7,5 à 2000°, tandis que nos nouvelles déterminations nous donnent seulement 6 à cette température.

Le fait de l'accroissoment de la chaleur spécifique des gaz parfaits avec la température est en opposition avec

(*) C. R. — 12 décembre 1881.

les idées reçues. Il est donc bon de discuter avec soin les preuves sur lesquelles on peut se fonder pour en affirmer la réalité.

Pour une expérience quelconque, dans laquelle le volume des gaz simples est v', le volume de la vapeur de saturation v'', on aura en désignant la chaleur spécifique du gaz simple par C_g, et, pour simplifier, $t \times 10^{-3}$ par T'

$$C_g = \frac{1}{v'}\left[\frac{58,2}{T'} - (1 + v'')(5,6 + 3,28\,T')\right]$$

$5,6 + 3,28\,T'$ étant la chaleur spécifique de H^2O.

En prenant la différentielle, il vient

$$dC_g = -\frac{1}{v'}\left[\frac{58,2}{T'^2} - (1 + v'')\,3,28\right]dT'.$$

Appliquons par exemple aux expériences 20 (25 X, 4) et 21 (25 X, 1). On a

	C_g	T,
20	5,8	1,640
21	5,4	1,580

Pour que la chaleur spécifique des gaz parfaits conserve, à toute température, la même valeur qu'à zéro, il faudrait que C_g fût égal à 4,9 dans les deux expériences. Pour qu'il en fût ainsi, il faudrait faire dC_g égal à $-0,9$ dans l'exp. (20), à $-0,6$ dans l'exp. (21). L'équation précédente montre qu'il faudrait en conséquence augmenter t de 140° pour (20), et de 94° pour (21). Nous ne pensons pas que de semblables erreurs soient compatibles avec nos expériences, d'autant plus que nos températures devraient être augmentées, et nous croyons avoir montré qu'elles ont été calculées par excès.

On peut d'ailleurs vérifier le fait de l'accroissement de la chaleur spécifique des gaz parfaits avec la température de trois façons différentes :

1° En se servant des expériences faites sur la combustion du cyanogène brûlant pour oxyde de carbone, puisque

cette combustion ne donne alors comme produits que des gaz parfaits ;

2° En se servant des expériences faites en mêlant des gaz parfaits au mélange tonnant d'oxyde de carbone et d'oxygène ;

3° Enfin en utilisant les expériences faites sur la combustion du formène CH^4.

Les expériences (4 XI, 3) et (14 VII, 1) faites avec le cyanogène donnent, pour la chaleur spécifique des gaz parfaits (azote et oxyde de carbone), la première 7,2 à 2500°, l'autre 6,9 à 2480° Nos expériences avec l'hydrogène et l'oxygène ont donné 6,2 à 2460°, et 7 environ à 2800°.

Il est vrai que dans les premières expériences il s'est formé un peu d'acide carbonique ; mais la quantité formée est faible, et si l'on en tenait compte, on trouverait pour la chaleur spécifique des gaz parfaits un nombre encore plus grand.

Les expériences faites sur la combustion du mélange tonnant (CO + O), additionné de gaz parfaits donnent les résultats contenus dans le tableau suivant.

NUMÉROS.	DATES.	VOL. GAZEUX mélangés à 1 volume de CO^2 formé.	T	$\frac{Q}{T}$	CHALEUR spécifique de CO^2.	CHALEUR spécifique du gaz parfait mélangé.
4	28 X, 2	CO 2,90 Vap. 0,06	1980°	34,4	13,6	7,0
8	27 X, 2	O 2,98 Vap. 0,06	1920	35,5	13,5	7,1
11	26 X, 2	Az 2,79 } 3,01 O 0,22 } Vap. 0,06	1980	34,4	13,6	6,7
12	26 X, 1	Az 2,49 } 3,06 O 0,57 } Vap. 0,06	1920	3,55	13,5	7,0
14	23 VI, 2	Az 3,57 } 4,01 O 0,44 } Vap. 0,10	1670	40,8	12,9	6,7

Ces nombres témoignent encore de l'accroissement de la chaleur des gaz simples; ils donnent même pour cet accroissement une valeur plus considérable que celle qui est donnée par les expériences sur la combustion de l'hydrogène et sur celle du cyanogène.

Les expériences faites sur la combustion du formène par l'air sont particulièrement intéressantes, malgré l'incertitude qui subsiste sur la composition exacte du gaz, en raison de l'énorme quantité de gaz parfaits qui se trouvent mêlés aux gaz brûlés. Nous ne pouvons utiliser que les observations faites avec excès d'oxygène; elles donnent les résultats suivants en prenant Q = 191900 calories (*).

NUMÉROS.	DATES.	VOL. GAZEUX mélangés à $1^v CH^4 + 2^v O$.	T	$\frac{Q}{T}$	CHALEUR spécifique calculée pour les gaz parfaits.	T_1
2	11 VI, 4	O 0,81 } Az 10,55 } 11,36 Vap. 0,25	1660°	115,5	6,77	1990°
3	11 VI, 3	O 0,37 } Az 8,90 } 9,27 Vap. 0,21	1870	102,5	6,82	2190
4	11 VI, 9	O 0,03 } Az 7,65 } 7,68 Vap. 0,19	2150	89,2	6,85	2350

Ces nombres montrent donc encore qu'il faut admettre un accroissement des chaleurs spécifiques des gaz simples pour expliquer les températures de combustion obtenues. La dernière colonne donne la température de combustion T_1 qu'on

(*) $CH^4 + 2O^2 = CO^2 + 2H^2O$. La quantité de chaleur Q se compose donc de la chaleur de combustion de $(C + O^2)$ égale à 97000; du double de la chaleur de combustion de la vapeur d'eau $(H^2 + O)$, égal à 16400; il faut en déduire la chaleur de combustion du formène à partir de ses éléments, soit 18500 (V. Berthelot, *Annuaire du Bureau des longitudes*).

aurait dû observer si, en admettant pour CO^2 et H^2O les chaleurs spécifiques déterminées plus haut, on supposait la chaleur spécifique des gaz parfaits constante et égale à 4,9. L'impossibilité de cette supposition résulte clairement de la comparaison de T et de T_1.

Les résultats de nos expériences concourent ainsi à montrer que la chaleur spécifique des gaz parfaits augmente réellement avec la température; mais ces résultats ne sont pas assez concordants pour qu'on en puisse tirer la loi qui régit cet accroissement.

Nous avions autrefois adopté une expression de la forme

$$C_v = at^2,$$

dans laquelle d'ailleurs nous avions attribué à a une valeur plus forte que celle qui résulterait des nombres précédents. La seule raison de cette forme insolite donnée à l'expression de C_v, et à laquelle nous n'attachions d'ailleurs qu'une valeur purement empirique, était de ne pas contredire la variation nulle ou faible que les observateurs avaient constatée aux températures ordinaires.

Maintenant que nous trouvons aux hautes températures des chaleurs spécifiques moins élevées qu'autrefois, nous représenterons les expériences d'une manière tolérable par la formule plus simple

$$C_v = 4,8 + 0,0006\,t, \qquad (5)$$

qui donne

à	0°	4,8
à	100	4,86
à	200	4,92
à	1000	5,4
à	2000	6,01
à	3000	6,6

L'augmentation, entre 100° et 200°, n'est que de 0,06, soit 1,2 p. 100. Elle nous paraît compatible avec les données de l'expérience.

d. *Chlore et acide chlorhydrique.*

On trouvera dans le tableau suivant les valeurs de $\frac{Q}{T}$ tirées de nos expériences sur la combustion du chlore par l'hydrogène.

Mélanges de chlore et hydrogène.

NUMÉROS.	DATES.	VOLUMES GAZEUX mélangés à 1 volume de Cl H.	T	$\frac{Q}{T}$
1	7 XII, 1	H 0,03 Vap. 0,02	2430	9,02
2	23 XII, 3	Cl 0,33 Vap. 0,02	1620	13,6
3	22 XII, 1	H 1,20 Vap. 0,03	1690	13,0
4	22 XII, 2	H 1,32 Vap. 0,03	1520	14,5

Les seules expériences qui puissent être considérées comme exemptes de dissociation sont celles des n°s 3 et 4.

L'expérience 4 donne, pour chaleur spécifique, à 1500°, d'un mélange contenant 1^v Cl H + $1^v,32$ H, le nombre 6,1, tandis que la formule (5) donne, à cette même température, pour les gaz parfaits, une chaleur spécifique égale à 5,8. L'expérience 3 donne une chaleur spécifique de 5,76 à 1690°, tandis que la formule (5) donne 5,8. Les différences sont peu considérables, ce qui nous permet de dire que l'acide chlorhydrique, dont la chaleur spécifique est, à la température ordinaire, égale à celle des gaz parfaits, lui reste encore égale au dessus de 1500°.

L'expérience n° 1 faite avec le mélange tonnant de Cl et H, donne une température T égale à 2430°, et, s'il n'y avait pas dissociation, il faudrait admettre que la chaleur spécifique de l'acide chlorhydrique est, à cette température,

égale à 12,1. Cette conséquence est évidemment inadmissible, d'après le résultat qu'on vient de tirer des expériences 3 et 4. Il en faut donc conclure que l'acide chlorhydrique éprouve, au-dessus de 1500° à 1600°, une dissociation notable.

Supposons, en effet, que 1 étant le volume total, ε soit la fraction combinée ; appelons en outre C′ la chaleur spécifique du chlore et C la chaleur spécifique de l'acide chlorhydrique, qui doit être environ 7 à la température de 2430° et qui est d'ailleurrs égale à celle de l'hydrogène ; Q étant la chaleur de combinaison, nous aurons

$$Q\varepsilon = \varepsilon CT + \left(\frac{1-\varepsilon}{2}\right) CT + \left(\frac{1-\varepsilon}{2}\right) C'T = \frac{1+\varepsilon}{2} CT + \frac{1-\varepsilon}{2} C'T$$

puisque, la combinaison se faisant sans changement de volume, le volume du gaz formé est ε.

Si l'on admettait $C = C'$, l'équation se simplifierait et deviendrait

$$Q\varepsilon = CT$$

d'où l'on déduirait

$$\varepsilon = C \cdot \frac{T}{Q} = \frac{7}{9,02} = 0,77.$$

Le volume combiné serait donc 0,23.

Mais la dissociation n'est sans doute pas aussi grande que celle qui résulterait de notre calcul, car il est très vraisemblable que la chaleur spécifique du chlore qui dépasse déjà de 1,76 celle des gaz parfaits à la température de 0°, croît avec la température beaucoup plus que ne le font les gaz parfaits, de sorte que C′ est beaucoup plus grand que C.

Supposons, par exemple, pour fixer les idées, $C' = 15$ à 2430°, en attribuant à C′ la loi d'accroissement la chaleur spécifique de l'hydrogène, on trouverait

$$\varepsilon = 0,85$$

d'où

$$1 - \varepsilon = 0,15.$$

Cette hypothèse de l'accoissement de la chaleur spécifique du chlore avec la température est fortement appuyée par l'expérience n° 2 faite avec un excès de chlore. Cette expérience donne, en effet, $\frac{Q}{T} = 13,6$, à 1620°. La chaleur spécifique de l'acide chlorhydrique étant environ 6 à cette température, il s'ensuit que, s'il n'y avait pas de dissociation, la chaleur spécifique du chlore à 1620° serait, en tenant compte de la petite quantité de vapeur d'eau,

$$\frac{13,4 - 6}{0,33} = 22,4.$$

La dissociation, s'il en existe une, ne peut pas dépasser celle de l'expérience n° 1, soit au plus 0,15 si, ce qui est exact comme nous l'allons voir, la chaleur spécifique de chlore n'est pas inférieure à 15. Admettons ce chiffre, certainement exagéré, il y aura, après la combustion, 0,85 Cl H, 0,075 H, 0,405 Cl, et l'on pourra écrire

$$\frac{Q}{T} = 13,4 = 0,96 + 0,405 \times C'$$

d'où l'on déduit

$$C' = 19,5.$$

La chaleur moléculaire du chlore, à 1620°, est donc comprise entre 19,5 et 22. L'accroissement, de 0° à 1620°, serait ainsi compris entre 12,9 et 15,4, soit, pour 1000°, entre 7,1 et 8,3. Cet accroissement est plus de deux fois supérieur à celui de la vapeur d'eau qui n'est que de 3,28 entre les mêmes limites.

Il y aurait eu un grand intérêt à multiplier les expériences faites avec excès de chlore; malheureusement le chlore attaquait énergiquement toutes les parties de l'appareil, de sorte que nous avons été obligés de renoncer à ces recherches.

3. TEMPÉRATURES DE COMBUSTION ET QUANTITÉS DE GAZ DISSOCIÉES DANS LE CAS OU IL Y A DISSOCIATION.

Connaissant les chaleurs spécifiques des gaz à haute température, il semble que nous pouvons utiliser les pressions développées par la combustion telles que les donne l'expérience, pour calculer dans les cas où il se produit une dissociation, la température de combustion et la quantité de gaz dissociée à cette température.

Malheureusement ces calculs ne peuvent guère s'appliquer utilement qu'aux mélanges gazeux qui contiennent de l'acide carbonique. Or nous ne connaissons la chaleur spécifique de ce gaz qu'au-dessous de 2000°, c'est-à-dire au-dessous des températures auxquelles la dissociation se produit. Pour les températures supérieures à 2000°, nous ne pouvons que nous servir d'une loi d'extrapolation, naturellement fort incertaine.

Nous avons examiné pour la chaleur spécifique de l'acide carbonique, trois formules d'extrapolation différentes. L'une est donnée par la formule parabolique représentée sur la *fig.* 3, Pl. XVIII. Nous l'avons rejetée à cause de la valeur maxima qu'elle assigne à la chaleur spécifique vers 2500°. L'autre est obtenue en reliant par une formule linéaire les deux valeurs de la chaleur spécifique à 0° et à 2000°. Elle s'accorde mal avec la valeur de la chaleur spécifique à 200°, et de plus elle conduirait à une dissociation nulle pour le gaz tonnant d'oxyde de carbone et d'oxygène, ce qui est contraire à l'expérience. Nous adopterons donc la troisième expression

$$c_0 = 4{,}33 \times \tau'^{0{,}367},$$

dans laquelle τ' est la température absolue divisée par 100. Cette formule est représentée sur la *fig.* 3, Pl. XVII, par la courbe en trait plein.

Pour calculer la dissociation au moyen de cette expression, nous emploierons les formules établies au commencement de ce mémoire, et qui sont les suivantes :

$$\frac{h}{\tau_0}[1+v+k(u-1)] = \frac{\Pi(1+v)}{\tau}, \qquad (1)$$
$$kuQ = [c+vc'+k(uc_1-c)](\tau-\tau_0). \qquad (2)$$

Dans ces expressions Q, τ, τ_0, Π, h ont la signification connue ; 1 est le volume du mélange tonnant, v celui des gaz inertes ajoutés, k la portion de volume tonnant qui s'est combiné, u est le volume occupé par l'unité de volume du mélange tonnant après la détonation ; dans le cas du mélange d'oxyde de carbone et d'oxygène, $u = \frac{2}{3}$. La chaleur spécifique moyenne, entre τ et τ_0, de l'acide carbonique, est c_1 ; celle de mélange tonnant est c ; celle des gaz inertes mélangés est c'. En prenant pour unité de volume 22^{lit},32, les chaleurs spécifiques employées seront les chaleurs moléculaires.

On peut remarquer que τ_0 étant peu différent de 273 et τ, étant grand, on peut prendre sans erreur sensible $\tau - \tau_0 = T$, T étant la température vulgaire.

Nous posons pour simplifier l'écriture

$$\frac{\pi\tau_0}{h} = p \quad \text{et} \quad p - 273 = p'.$$

L'équation (1) devient

$$k = \frac{3}{\tau}(1+v)(T-p'). \qquad (a)$$

Portant cette valeur de k dans (2), on obtient, après des transformations très simples

$$\left.\begin{aligned} \frac{2(1+v)(T-p')Q}{T} &- c\tau + 3(1+v)(T-p')c \\ &- vc'\tau - 2(1+v)(T-p')c_1 = 0. \end{aligned}\right\} \quad (b)$$

Cette équation, qui ne contient plus que T, peut être résolue aisément en essayant successivement différentes valeurs de T. Ayant T et par conséquent $\tau = T + 273$, l'équation (3) fait connaître la valeur de k.

C'est ainsi qu'ont été obtenus les nombres des deux dernières colonnes du tableau suivant :

DATES.	VOLUMES gazeux ajoutés à 1 vol. de CO + O	h	θ_0	$\frac{\Pi}{h} \cdot \frac{\tau_0}{273}$	T	k	OBSERVATIONS.
30 VI, 2	Vap. 0,012	76,0	10°	9,95	3130°	0,61	
8 V, 2	CO^2 0,48 Vap. 0,02	77,1	14°	8,18	2590	0,98	
28 X, 1	CO 0,51 Vap. 0,02	73,1	11°	9,5	2646	0,83	
23 VI, 3	Az 1,27 Vap. 0,05	76,4	18°	8,6	2460	0,96	Mélange tonnant avec l'air.

Nous ne pousserons pas plus loin ces calculs qui n'auraient pas grande utilité en raison de l'incertitude qui règne sur les vraies valeurs des chaleurs spécifiques de l'acide carbonique au-dessus de 2000°.

Nous ferons remarquer seulement que si l'on considère les expériences (30 VI, 2), (28 X, 1) et (23 VI, 3), et si on cherche au moyen de ces trois points à se faire une idée de la forme de la courbe qui représenterait k en fonction de T, on voit qu'on serait conduit à admettre $k = 0$, c'est-à-dire une dissociation totale vers 3400° ; et $k = 1$, c'est-à-dire une dissociation nulle vers 2000°. Cette dernière conclusion est conforme à l'expérience. La variation de k, d'abord très rapide entre 3400° et 3000°, serait ensuite très lente entre 3000° et 2000°.

CHAPITRE III.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Après être entré dans tous les développements nécessaires pour faire connaître le procédé d'expérimentation, ainsi que les calculs laborieux qui nous ont permis de tirer parti des données de l'observation, il est utile de résumer brièvement les principaux résultats auxquels nous sommes parvenus.

Nous avons d'abord constaté dans une première série de recherches infructueuses, que les pressions développées pendant la propagation de la combustion dans un mélange gazeux sont, au contact même de la zone enflammée, supérieures à la pression statique qui résulterait de la dilatation produite sous l'influence de la température de combustion. Avant de se communiquer à toute la masse, l'accroissement de pression concentre en quelque sorte son action sur la tranche au contact. Cet effet est d'autant plus sensible que la propagation est plus rapide.

Dans une autre série de recherches, faites avec un appareil enregistreur, nous avons pu obtenir des tracés graphiques représentant, par un trait continu, la loi de variation, avec le temps, de la pression qu'exerce une masse gazeuse combustible en repos, enfermée dans une enceinte close, depuis le moment où l'inflammation est provoquée au centre de la masse jusqu'au moment où le gaz brûlé est revenu à la température de l'enceinte.

Lois de refroidissement des gaz. — Nous avons pu suivre ainsi la marche du refroidissement d'un gaz ou

d'une vapeur de composition connue, en vase clos, partant d'une température qui s'est élevée dans certains cas à plus de 4000°, pour s'abaisser à la température ambiante. Nous avons étudié le phénomène avec grand soin, et nous avons reconnu que la loi du refroidissement varie beaucoup suivant la nature du gaz.

Si le gaz est permanent, c'est-à-dire n'éprouve pas de condensation pendant le refroidissement, ou n'éprouve qu'une condensation partielle très faible, la vitesse de refroidissement est correctement représentée par une expression de la forme

$$\frac{d\theta}{dt} = a\varepsilon + b\varepsilon^2,$$

ε étant à chaque instant l'excès de la température du gaz sur celle de l'enceinte.

Les coefficients a et b ne sont pas très différents pour les divers gaz permanents, CO^2, O, Az, CO.

Le coefficient a paraît à peu près indépendant de la pression, autant qu'on en peut juger d'après nos expériences, qui ne présentent de garanties d'exactitude qu'aux températures élevées pour lesquelles le terme $a\varepsilon$ a peu d'importance.

Le coefficient b diminue lorsque la densité du gaz augmente, et réciproquement.

La même formule s'applique encore lorsqu'à une vapeur condensable comme la vapeur d'eau, vient s'ajouter dans le mélange gazeux un gaz extrêmement conducteur comme l'hydrogène, de sorte que l'influence refroidissante du gaz permanent reste prépondérante. Mais dans ce cas les coefficients a et b ont naturellement des valeurs très différentes de celles qu'elles ont dans le premier.

Lorsque le gaz est complètement condensable, et formé par exemple en totalité par de la vapeur d'eau, la loi que suit la chute de pression est représentée assez correctement depuis la pression la plus élevée jusqu'aux plus

basses par l'expression très simple

$$\frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0),$$

ϖ étant la pression variable, et p_0 la tension de la vapeur d'eau à la température de l'enceinte.

Lorsque le gaz est partiellement condensable, et formé par exemple par de la vapeur d'eau mélangée à des gaz permanents autres que l'hydrogène, la chute de pression suit une loi plus complexe définie par l'expression

$$\log \frac{1}{\varpi - p_0} \frac{d\varpi}{dt} = a(\varpi - p_0) + b(\varpi - p_0)^2,$$

ϖ étant toujours la pression variable, et p_0 étant la pression du mélange gazeux, lorsqu'il est arrivé à la température de l'enceinte.

La même loi s'applique au gaz acide chlorhydrique, se refroidissant en présence de l'eau qui le dissout.

Dissociation. — L'étude des courbes de refroidissement telles qu'on peut les déduire de l'étude attentive de nos tracés graphiques automatiques, permet de résoudre une question d'un grand intérêt théorique et pratique sur lequel on n'avait, avant nos recherches, que des données très vagues.

Dans un admirable travail, Henri Sainte-Claire-Deville avait constaté et démontré que les gaz composés, tels que l'acide carbonique, la vapeur d'eau, l'oxyde de carbone, l'acide chlorhydrique, se dissocient en se décombinant partiellement aux températures élevées. Mais on ne possédait presque aucune donnée précise sur les températures auxquelles cette dissociation, pour les gaz que nous venons de nommer, commence à devenir notable.

On savait seulement, d'après les beaux travaux de M. Crafts, que l'acide carbonique n'éprouve pas encore de

dissociation sensible à la température de 1500°. Ce fait était très important, car il était en opposition avec les idées qu'avaient généralement adoptées les chimistes après les travaux de Deville.

Les courbes de refroidissement nous ont permis de constater avec précision que lorsqu'une masse d'acide carbonique, portée à la température de combustion, se refroidit en vase clos, la dissociation qui a pris naissance au moment de la combustion, va en s'atténuant sans cesse, par la recombinaison des éléments, jusqu'à ce que la température *moyenne* des gaz atteigne 1800° environ. C'est au moins ce qui se produit lorsque la densité de l'acide carbonique est telle qu'il exerce, dans l'enceinte qui le contient une pression de 50 centimètres de mercure environ à la température de 15°.

La température *moyenne* du gaz, au moment où la dissociation prend fin, varie avec la densité et diminue avec elle. Elle n'est plus que de 1600° lorsque la pression du gaz à la température ordinaire est de 28 centimètres, et de 1160° seulement, lorsque cette pression n'est plus que de 13 centimètres.

Nous avons pu reconnaître aussi l'influence, sur la dissociation de l'acide carbonique, des gaz qui lui sont mélangés.

Lorsque ces gaz sont CO, O, Az, ils agissent comme si on diminuait la pression de l'acide carbonique, et la température moyenne à laquelle la dissociation finit, est abaissée, toutes choses égales d'ailleurs. L'effet est plus marqué avec l'azote qu'avec les deux autres gaz ; plus marqué avec l'oxygène qu'avec l'oxyde de carbone.

Quant à la vapeur d'eau, nous n'avons pu reconnaître l'existence d'une dissociation quelque peu notable. Il se peut que la dissociation soit masquée par la vitesse de condensation ; en tout cas, elle doit être très faible encore à 3300°, qui est la température de combustion, en vase clos, du mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène.

Nous n'avons pas non plus constaté de dissociation sensible de l'oxyde de carbone, soit que cette dissociation soit très faible encore vers 3 ou 4000°, soit qu'elle ne donne pas lieu à une variation de température notable, soit enfin que la recombinaison se fasse d'une manière assez lente pour que l'effet qu'elle produit échappe à notre procédé d'observation.

La dissociation de l'acide chlorhydrique n'est pas visible sur nos courbes de refroidissement, mais nous avons pu déduire la dissociation de ce gaz vers la température de combustion, de la comparaison entre cette température, la chaleur spécifique des gaz et la chaleur de combinaison.

Températures de combustion à volume constant. — En utilisant pour les corrections nécessaires, les données acquises sur la loi de refroidissement, nous avons pu déterminer pour chacun des nombreux mélanges expérimentés par nous, la pression que développe la combustion en vase clos.

De la valeur de cette pression nous avons déduit, lorsqu'il n'y avait pas de dissociation, la *température de combustion*.

Cette température est obtenue en admettant que le mélange gazeux, tel qu'il résulte de la combustion, obéit aux lois de Mariotte et de Gay-Lussac. C'est en effet ce qu'il semble permis d'admettre, au moins dans les limites d'approximation que comportent nos expériences. M. Crafts a d'ailleurs vérifié directement le fait pour l'acide carbonique jusque vers 1500°.

Voici quelques-unes des températures de combustion que nous avons déterminées. Elles se rapportent à des mélanges gazeux saturés d'humidité à la température ordinaire. Nous donnons, non pas les températures directement obtenues par l'expérience, mais celles que l'on en déduit au moyen des courbes continues qui représentent

les moyennes de toutes les observations. Les écarts entre ces courbes et les nombres expérimentaux ne dépassent pas 60°.

	$\frac{\Pi}{k} \cdot \frac{\tau_0}{273}$	T	
$O + O$	9,9	3130°	0,61 gaz combiné.
$O + O + 1,5\ CO^2$	7,1	1980°	
Id. $+ 2,25\ CO^2$	6,2	1616°	
Id. $+ 0,75\ CO^2$	9,5	2646°	0,83 gaz combiné.
Id. $+ 0,94\ Az^2$	8,6	2460°	0,96 id.
Id. $+ 2,9\ CO$	7,4	1980°	
Id. $+ 2,98\ O^2$	7,2	1920°	
Id. $+ 3,0\ Az^2$	7,2	1960°	
Id. $+ 4,0\ Az^2$	6,6	1670°	
$C^2Az^2 + O^2$	16,4	4190°	
$C^2Az^2 + O^2 + 3,75\ Az^2$	12,0	2500°	
$H^2 + O$	9,0	3350°	
$H^2 + O + 0,75(O^2, H^2)$	8,7	2830°	
Id. $+ 3,0\ (Az^2, O^2, H^2)$	7,3	1930°	
Id. $+ 6,0\ (Az^2, O^2, H^2)$	5,5	1320°	
Id. $+ 2,25\ CO^2$	»	1550°	
Id. $+ 3,0\ CO^2$	»	1300°	
$Cl + H$	8	2430°	
$I + H + 2,4\ H$	»	1630°	
Id. $+ 0,66\ Cl$	»	1620°	
$CH^4 + 2,8\ O^2 + 10,5\ Az^2$	6,96	1660°	
$CH^4 + 2,37\ O^2 + 8,9\ Az^2$	8,33	1870°	
$CH^4 + 2,0\ O^2 + 7,24\ Az^2$	9,34	2150°	

Les températures de combustion que nous avons mesurées sont celles d'un mélange gazeux brûlant en vase clos. Les températures de combustion ordinaires sont celles d'un mélange gazeux qui peut se dilater en brûlant, la pression restant constante. Nous verrons tout à l'heure comment on peut les évaluer.

Chaleurs spécifiques des gaz. — Lorsqu'un mélange gazeux brûle sans éprouver de dissociation, on peut relier par une équation simple la chaleur de combinaison, la température de combustion et la chaleur spécifique

moyenne, entre cette température et zéro, des gaz qui subsistent après la combustion. Connaissant par nos expériences la température de combustion, et la chaleur de combinaison étant donnée par les tables de M. Berthelot, nous avons pu calculer, pour les mélanges où nous avions pu constater l'absence de la dissociation, la chaleur spécifique moyenne, entre 0° et la température de combustion, du produit gazeux plus ou moins complexe de la combustion.

Acide carbonique. — On peut s'arranger pour que les produits gazeux de la combustion ne contiennent qu'une seule espèce de gaz. C'est à quoi on arrive, par exemple, en ajoutant de l'acide carbonique au mélange tonnant d'oxyde de carbone et d'oxygène. Dans ce cas, l'observation de la température de combustion donne la chaleur spécifique de l'acide carbonique entre 0° et des températures, variables avec la quantité d'acide carbonique ajoutée, mais voisines de 2000°.

Nous avons pu ainsi déterminer, avec quelque précision, la chaleur spécifique moléculaire moyenne de l'acide carbonique vers 2000°, et établir qu'elle est égale à 13,6. En combinant cette donnée avec la valeur de la même chaleur spécifique à 0°, et son accroissement moyen entre 0° et 200°, on arive à représenter la chaleur spécifique moyenne entre 0° et 200° par une formule d'interpolation.

On peut prendre une formule parabolique à trois termes, qui a l'inconvénient de donner, vers 2500°, un maximum dont l'existence n'est nullement établie.

On peut aussi prendre une formule exponentielle qui, donnant presque exactement entre 0° et 2000° les mêmes valeurs que la formule parabolique, contient un coefficient de moins. Cette formule est la suivante, dans laquelle τ est la température absolue,

$$c_v = 4{,}33 \cdot (\tau \cdot 10^{-2})^{0{,}367}.$$

Elle est très voisine de la formule encore plus simple

$$c_v = 4,74 \sqrt[3]{T \cdot 10^{-2}},$$

qui s'accorde assez bien avec les nombres donnés entre 0° et 200°, par M. L. Wiedmann.

Vapeur d'eau. — Nous avons établi que la vapeur d'eau ne se dissocie pas, ou ne se dissocie que très peu à la température de combustion en vase clos, c'est-à-dire à 3350°. L'observation de cette température nous a donc permis de calculer la chaleur spécifique de la vapeur d'eau à 3350°, et nous l'avons trouvée égale à 16,6. En comparant ce nombre avec la chaleur spécifique entre 100° et 200° mesurée par Regnault et la loi d'accroissement de cette chaleur spécifique entre 0° et 100° telle qu'elle résulte d'expériences, malheureusement très indirectes, de M. Winckelmann, nous avons pu représenter la chaleur spécifique moléculaire moyenne de la vapeur d'eau, pour les températures comprises entre 0° et 3300°, par la formule empirique linéaire

$$c_v = 5,61 + 3,28\,t \cdot 10^{-3}.$$

La chaleur spécifique de la vapeur d'eau à 2000° est égale à 12,2, et celle de l'acide carbonique à la même température est égale à 13,6. La différence n'est pas très considérable, et l'on peut en conclure que les chaleurs spécifiques de ces deux gaz, qui ne diffèrent pas beaucoup entre elles à 0°, restent encore peu différentes l'une de l'autre à 2000°, malgré l'augmentation très considérable qu'elles subissent l'une et l'autre.

La détermination des températures de combustion du gaz obtenu, en ajoutant de l'acide carbonique au mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène, nous a permis de comparer entre elles, à des températures inférieures à 2000°, les chaleurs spécifiques de la vapeur d'eau et de l'acide

carbonique, telles qu'on peut les déduire des formules précédemment établies. Lorsqu'on part de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau, les expériences dont il s'agit donnent pour la chaleur spécifique de l'acide carbonique des valeurs un peu plus faibles que celles données par la formule.

Gaz parfaits. — Nous avons multiplié les expériences pour fixer les valeurs de la chaleur spécifique des gaz parfaits (O, H, Az, CO) aux températures élevées.

Nous avons d'abord reconnu que, pour toute l'étendue de l'échelle des températures qu'ont embrassée nos expériences, la température de combustion reste la même, dans l'ordre d'approximation de nos mesures, lorsque, dans un mélange gazeux, on remplace un volume de l'un des gaz, par un volume égal d'un des autres. On peut donc en déduire cette loi que nous avons les premiers formulée en 1882 dans notre note des Comptes-rendus :

Les chaleurs spécifiques moléculaires des gaz parfaits, qui sont égales entre elles aux températures ordinaires, le sont encore aux températures élevées jusque près de 3000° et peut-être au-dessus.

On sait que l'invariabilité de ces chaleurs spécifiques avec la température a été établie par Regnault à 1 ou 2 p. 100 près entre 100° et 200°. Confirmée par les expériences de M. Wiedmann, cette invariabilité avait été considérée par tous les physiciens comme l'un des caractères fondamentaux des gaz parfaits, bien qu'elle ne résultât d'aucune idée théorique. Il était donc très important de voir si cette invariabilité existait encore aux températures élevées.

Pour résoudre la question, nous avons ajouté au mélange tonnant d'oxyde de carbone et d'oxygène des quantités variables de Az, O, CO. Étant connue la chaleur spécifique de l'acide carbonique, ces expériences donnent les cha-

leurs spécifiques des gaz ajoutés. On constate ainsi une augmentation notable de la chaleur spécifique des gaz parfaits qui passerait de la valeur de 4,8 vers 0°, à la valeur de 7 environ vers 2000°. Toutefois ces expériences sont suspectes. D'une part en effet on n'est jamais certain, avec de semblables mélanges, de n'avoir pas de dissociation, d'autre part la lenteur de la propagation donne lieu à des corrections toujours un peu incertaines.

Nous avons fait ensuite un grand nombre d'expériences en ajoutant des gaz parfaits, Az, O, H, au mélange tonnant d'hydrogène et d'oxygène. Les expériences sont beaucoup meilleures, non seulement parce que l'absence de la dissociation est certaine, de l'autre parce que la propagation est rapide, et la correction, sinon plus faible, au moins plus assurée. En partant de la chaleur spécifique de la vapeur d'eau telle qu'elle avait été déterminée plus haut, chaleur plutôt prise par excès, puisque nous avons négligé la dissociation à 3300°, nous avons encore trouvé pour la chaleur spécifique des gaz parfaits des valeurs croissantes avec la température.

Nous avons encore déduit l'augmentation de la chaleur spécifique des gaz parfaits des expériences faites en brûlant le cyanogène avec l'air pour oxyde de carbone. Nous avions deux expériences régulières et suffisamment concordantes, donnant pour la chaleur spécifique des gaz parfaits, la valeur de 2500°. Il est vrai que dans cette combustion il se forme une certaine quantité, relativement faible, d'acide carbonique, mais cette circonstance paraît plutôt de nature à élever qu'à abaisser le chiffre que nous avons trouvé.

Enfin les expériences faites sur la combustion du formène (CH^4) sont d'accord avec les précédentes pour montrer que les chaleurs spécifiques des gaz parfaits sont plus grandes aux températures élevées qu'à la température ordinaire.

Nous sommes donc arrivés à conclure, contrairement à l'opinion universellement reçue, que les chaleurs spéci-

fiques des gaz parfaits augmentent avec la température, quoique beaucoup moins rapidement que celles des autres gaz.

Nous nous applaudissons vivement que cette conclusion, formulée par nous pour la première fois en 1882, ait été depuis cette époque, confirmée par les travaux de M. Berthelot et Vieille.

Quant à la loi de la variation constatée, elle ne peut être formulée qu'avec beaucoup de réserves. Entre 0° et 3000°, elle ne s'éloignerait cependant pas beaucoup d'être représentée par l'expression

$$c = 4,8 + 0,0006t.$$

Il faut remarquer avec quelle rapidité les chaleurs spécifiques des gaz parfaits vont en s'écartant de celles des autres gaz à mesure que la température augmente.

On a en effet

	0°	2000°
Gaz parfaits	4,8	6,0
H^2O	5,6	12,2
CO^2	6,3	13,6

Acide chlorhydrique. — Nous avons fait un certain nombre d'expériences avec les mélanges de chlore et d'hydrogène. Elles nous ont amenés à conclure que la chaleur spécifique de l'acide chlorhydrique est encore sensiblement la même que celle des autres gaz parfaits, à la température de 1800° environ.

En rapprochant ce chiffre de celui de la température de combustion du mélange tonnant, nous en avons conclu que l'acide chlorhydrique éprouve une dissociation, mais seulement dans le voisinage de la température de combustion du mélange tonnant, c'est-à-dire vers 2400° environ.

Chlore. — Enfin d'une expérience faite sur un mélange de chlore et d'hydrogène avec excès de chlore, nous avons

pu conclure que la chaleur spécifique du chlore subit, avec la température, une augmentation du même ordre que celle qui a été constatée pour les gaz non parfaits, tels que la vapeur d'eau et l'acide carbonique.

Températures de combustion à pression constante. — Les chaleurs spécifiques à volume constant des principaux gaz étant connues, on peut s'en servir pour résoudre une question des plus importantes dans les applications de toutes sortes, c'est-à-dire pour calculer les températures de combustion, soit en vase clos, soit à pression constante, d'un mélange explosif dont les éléments sont formés par deux ou plusieurs des gaz H, O, Az, CO, CO^2, H^2O, à la conditions toutefois que la combustion ne soit pas accompagnée d'une dissociation.

Pour calculer les températures de combustion en vase clos, il suffira de prendre les valeurs des chaleurs spécifiques résultant des formules précédentes, et de les combiner avec les chaleurs de combustion.

Lorsqu'il s'agit de combustions à pression constante, telles qu'elles ont lieu dans les foyers ordinaires, il faudra diminuer de 1,96 les chaleurs spécifiques données par les formules. On trouve alors les nombres suivants :

	Températures de combustion à pression constante.
$H^2 + O$	3200°
$H^2 + O + 1,882 Az^2$ (mélange tonnant avec air).	2000°
$CO + O + 1,882 Az^2$ (id. id.).	2115° ? (Dissociation probable)
$CH^4 + 2O^2 + 7,70 Az^2$ (id. id.).	1860°

Considérations théoriques. — La détermination des températures de combustion, dans des cas très variés, n'est pas le seul intérêt de nos expériences, et nous désirons, en terminant, appeler l'attention sur l'importance théorique que présente le fait, bien certain, de l'accrois-

sement continu des chaleurs spécifiques gazeuses avec la température.

Avant la publication de nos recherches, on ne connaissait la chaleur spécifique d'aucun gaz au-dessus de 200°. Regnault, dans ses mémorables travaux, avait constaté que la chaleur spécifique de l'acide carbonique croît notablement entre 0° et 200°, mais que celle des gaz parfaits reste invariable dans les mêmes limites.

On avait été à peu près universellement d'accord pour attribuer l'accroissement de la chaleur spécifique de l'acide carbonique avec la température à ce fait que ce gaz est, à la température ordinaire, assez voisin de son poids de liquéfaction. On supposait que cet accroissement devait rapidement s'atténuer et disparaître à mesure que la température s'élevait, le gaz se rapprochant alors de cet état idéal, plus ou moins vaguement défini, qui constituerait le gaz parfait.

C'est ainsi que M. Bunsen, après avoir déterminé pour la première fois, avec quelque approximation, une température de combustion, était amené à attribuer à l'effet de la dissociation un phénomène qui, pour la plus grande partie, était dû à une augmentation de la chaleur spécifique des gaz.

M. Berthelot avait appelé l'attention sur la possibilité de l'accroissement continu, avec la température, de la chaleur spécifique de l'acide carbonique et de la vapeur d'eau.

Les premiers, nous avons constaté la réalité de cet accroissement et nous en avons mesuré la grandeur. Nous avons même montré que cet accroissement continu des chaleurs spécifiques gazeuses avec la température n'est pas particulier aux gaz sur lesquels on l'avait constaté entre 100° et 200°, comme l'acide carbonique, ou sur lesquels on l'avait soupçonné, comme la vapeur d'eau; mais qu'il se manifeste encore, quoiqu'avec une rapidité moindre,

avec les gaz dits parfaits, pour lesquels elle est insensible entre 100° et 200°.

Cet accroissement de la chaleur spécifique est ainsi commune à tous les gaz, et l'une des propriétés considérées comme essentielles à l'état gazeux idéal doit disparaître de la science.

Il n'y a pas, il nous semble, à s'en étonner beaucoup. L'état gazeux est en effet régi par deux lois, celles de Mariotte et de Gay-Lussac. Ces lois sont évidemment des conséquences de la nature des actions intermoléculaires, et de l'espèce particulière de mouvement que prend le centre de gravité des molécules sous l'action de la chaleur. C'est la nature de ces actions et l'espèce de ce mouvement qui sont heureusement expliquées par la célèbre hypothèse de Bernouilli, et qui pourraient peut-être être expliquées ou définies par d'autres hypothèses équivalentes.

Mais si les propriétés gazeuses qui ne dépendent que des actions intermoléculaires et du mouvement des centres de gravité moléculaires peuvent être considérées comme bien connues, sinon rationnellement et complètement expliquées, il en est tout autrement des propriétés qui tiennent à la nature de ce petit édifice complexe, et très mystérieux encore, auquel nous donnons le nom de *molécule*. La molécule des gaz est vraisemblablement tout aussi complexe que celle des solides, et la manière dont elle se comporte sous l'influence de la chaleur ne nous est pas mieux connue dans un cas que dans l'autre. La simplicité des lois des gaz s'arrête donc, si l'on peut s'exprimer ainsi, au seuil de la molécule.

Voilà pourquoi nous ne pouvons connaître qu'expérimentalement, sans qu'il nous soit permis de faire appel à aucune théorie, la manière dont la chaleur spécifique des gaz varie avec la température. Cette chaleur spécifique, c'est-à-dire le rapport de la quantité de chaleur fournie, à l'accroissement de température qui en résulte, dépend en

effet non seulement de l'accroissement de température ou de force vive du centre de gravité, mais encore de l'accroissement de force vive de la molécule par rapport à son centre de gravité.

On avait cependant cru pouvoir établir une relation entre la force vive intérieure de la molécule et celle de son centre de gravité.

Si l'on appelle (*) U l'énergie *totale* d'une masse gazeuse T la température absolue, C_v la chaleur spécifique vraie à volume constant, on a

$$\frac{dU}{dt} = C_v. \quad (1)$$

Si l'on admet que C_v ne varie pas avec la température, une intégration simple donne

$$U - U_0 = C_v(T - T_0), \quad (2)$$

d'où l'on déduit que la variation de l'énergie totale d'un gaz est proportionnelle à la température absolue.

Si l'on admet en outre : 1° qu'au zéro absolu, l'énergie est nulle ; 2° que l'on peut refroidir le gaz jusqu'à ce zéro absolu sans que l'équation fondamentale $\frac{dU}{dT} = C_v$ cesse de lui être applicable, on aura évidemment

$$U = C_v T. \quad (3)$$

Comme tout est connu dans le second membre, si C_v est constant, on connaîtra U, c'est-à-dire l'énergie totale du gaz, comprenant la force vive du centre de gravité et l'énergie intérieure de la molécule. On trouve ainsi que dans les gaz parfaits l'énergie intérieure de la molécule est la moitié de sa force vive de translation.

(*) *Théorie mécanique de la chaleur*, par C. Briot. 2e éd, p. 82 et 83.

On n'a peut-être pas suffisamment remarqué, il nous semble, que la relation (3) est formellement démentie par l'expérience.

Supposons par exemple qu'on mette en présence une molécule d'oxygène et deux molécules d'hydrogène à 0°. La quantité d'énergie des trois molécules serait

$$3 \times 4,8 \times 273 = 3930 \text{ calories.}$$

Or, au moyen d'une étincelle électrique, c'est-à-dire en ajoutant à l'énergie totale du gaz une quantité d'énergie très faible et négligeable, on provoque la combinaison qu produit deux molécules de vapeur d'eau. Ces deux molécules contiendraient à zéro

$$2 \times 5,6 \times 273 = 3060 \text{ calories}$$

et en outre on a recueilli 116.400 calories.

Le système initial, soustrait à toute force extérieure, aurait donc vu son énergie totale croître subitement d'une façon énorme.

Le raisonnement qui nous a conduits à cette conséquence est donc inexact, et l'intérieur d'une molécule gazeuse doit contenir une énergie totale beaucoup plus considérable que celle qui résulterait de l'équation (3); cette énergie intérieure au lieu d'être la moitié de la force vive de translation, est en réalité au moins quarante fois plus grande, et peut être même beaucoup plus considérable encore.

L'équation (3) est en effet déduite de deux principes, dont l'un paraît très contestable, et l'autre est certainement faux. Le premier, c'est que les gaz peuvent être refroidis jusqu'au zéro absolu, en gardant toutes les propriétés qu'ils possèdent à la température ordinaire. Le second, dont l'inexactitude ressort de notre travail, c'est que la chaleur spécifique des gaz est invariable avec la température.

Il faut remarquer que, la température d'un gaz étant définie par la force vive du centre de gravité, dire que la chaleur spécifique croît avec la température, c'est dire que l'énergie totale croît plus vite que la force vive du centre de gravité. Ce phénomène paraîtra moins surprenant si, conformément à ce que nous venons de dire, on admet que la force vive du centre de gravité n'est qu'une fraction très petite de l'énergie totale.

Quoi qu'il en soit, il est bien certain que c'est l'observation directe qui peut seule nous faire connaître celles des propriétés des gaz qui dépendent de la nature et de l'arrangement intérieur de la molécule. Aucune théorie ne nous fait même entrevoir la vérité sur ce point.

L'étude des variations des chaleurs spécifiques gazeuses avec la température, est, sous ce rapport, l'une des plus importantes et probablement des plus fructueuses qu'on puisse se proposer. L'imperfection de nos expériences sur ce sujet n'est que trop évidente. Nous croyons cependant qu'elles auront servi utilement à établir quelques faits importants, et à jeter quelque lumière sur une route encore peu explorée. Nous espérons, en tous cas, qu'on voudra bien leur tenir compte de ce qu'elles ont été les premières en date.

NOTE ADDITIONNELLE.

M. *Neyreneuf*, professeur à la Faculté des sciences de Caen, a écrit à M. le président de la Commission des *Annales des Mines* pour se plaindre que nous ayons omis, dans notre travail sur la propagation de la flamme, de mentionner ses propres recherches sur le même sujet, et pour demander que cette omission soit réparée.

Quoique nous soyons surpris que M. Neyreneuf n'ait pas cru préférable de s'adresser directement à nous pour une semblable réclamation, nous allons lui accorder la satisfaction qu'il demande.

M. Neyreneuf, en faisant brûler des mélanges gazeux explosifs dans des éprouvettes, ou dans des tubes, enduits entièrement de paraffine, a constaté, par l'examen des empreintes laissées sur cette substance, que la combustion est accompagnée par des vibrations.

Quant à ce qui regarde la loi même de la propagation de la combustion, à l'existence d'une période de propagation sans vibration avec vitesse constante, à l'influence des vibrations sur la vitesse de propagation, c'est-à-dire en somme ce qui fait l'objet propre, et même le seul objet de nos recherches, voici, dans les diverses notes des *Comptes rendus*, publiées par M. Neyreneuf, la seule phrase qui y ait trait; nous la transcrivons textuellement (*) :

« Mais l'état de vibration agit aussi sur l'énergie de la combustion et, par « suite, sur sa puissance de refoulement. Nous verrons plus loin des effets de « cette modification d'énergie que l'on peut vérifier directement par l'expé- « rience suivante. Un mélange formé de 1 CO et de 1 O (**) brûle sans bruit « et avec une grande lenteur dans une éprouvette à gaz ordinaire; la combus- « tion est, au contraire, très rapide, si on la produit dans un tube de plus « petit diamètre, mais tel que l'inflammation à l'ouverture produise des vi- « brations sonores (***). »

MM. Schlœsing et Demondésir avaient, longtemps avant M. Neyreneuf, dans un travail que nous avons souvent cité, constaté, d'une façon bien plus précise, l'influence de l'agitation des gaz sur la vitesse de propagation.

(*) Sur la lumière stratifiée. — *C. R.*, 91, p. 322 (1880).

(**) Dans une réclamation de priorité déjà adressée contre nous à l'Institut en 1882, M. Neyreneuf se borne à transcrire à peu près intégralement cette phrase, mais il remplace ici O par air.

(***) Le travail paru en 1875 dans les *Mémoires de l'Académie nationale des sciences, arts et belles-lettres de Caen*, et dont nous n'avions d'ailleurs aucune connaissance avant l'envoi qui nous en a été fait récemment par M. Neyreneuf, n'est pas plus explicite. Il en est de même d'un mémoire publié dans les *Annales de chimie et de physique*.

EXPLICATION DES PLANCHES.

Pl. XII.

Fig. 1. Apppareil destiné à mesurer les pressions développées par la combustion au moyen du manomètre Deprez.

Fig. 1'. Détail du manomètre Deprez.

Fig. 2. Diagramme d'une sinusoïde à amplitude décroissante.

Fig. 3, 4, 5 et 6. Courbes représentant, pour divers mélanges gazeux, la loi qui lie, à la pression dans le cylindre eudiométrique, la vitesse de chute de cette pression.

Pl. XIII et XIV.

Courbes représentant, pour divers mélanges gazeux, la loi qui lie, à la pression qui s'exerce dans le cylindre eudiométrique, la vitesse de chute de cette pression.

Pl. XV.

Fig. 1, 2, 3, 4. Courbes représentant, pour divers mélanges gazeux, l'influence de la nature du gaz sur la variation de la durée D_p de propagation de la flamme dans le cylindre.

Fig. 5, 6, 7, 8. Portions initiales de divers diagrammes décrits par le style enregistreur. (Réduction de moitié.)

Fig. 9. Diagramme (réduit de moitié) décrit par le style enregistreur dans l'expérience (4 XI, 3) faite avec un mélange de cyanogène et d'air brûlant pour CO. — La figure représente aussi le diagramme inscrit par le diapason enregistreur battant le centième de seconde.

Pl. XVI.

Fig. 1, 2, 3, 4. Courbes se rapportant à l'étude de la propagation de la flamme dans le cylindre, pour l'expérience (4 XI, 3).

Fig. 5. Courbes ayant pour ordonnées les pressions développées par la combustion et pour abscisses les volumes de gaz inertes qui se trouvent dans un volume de mélange combustible. L'élément combustible est CO.

Fig. 6. Courbes analogues à celles de la fig. 5. L'élément combustible est H.

Pl. XVII.

Fig. 1. Courbe analogue à celle des fig. 5 et 6, Pl. XVI. L'élément combustible est H, l'élément comburant Cl.

Fig. 2. Courbe analogue à celle de la fig. 1. L'élément combustible est CH^4, l'élément comburant est l'air.

Fig. 3. Courbes représentant la loi de variation, avec la température, des chaleurs spécifiques moléculaires à volume constant, de CO^2, de H^2O et des gaz parfaits.

Pl. XVIII.

Fig. 1. Appareil destiné à mesurer, au moyen du manomètre enregistreur Bourdon, les pressions développées par la combustion.

TABLE DES MATIÈRES.

PREMIER MÉMOIRE

TEMPÉRATURES D'INFLAMMATION DES MÉLANGES GAZEUX

DEUXIÈME MÉMOIRE

SUR LA VITESSE DE PROPAGATION DE LA FLAMME DANS LES MÉLANGES GAZEUX.

TROISIÈME MÉMOIRE

SUR LES TEMPÉRATURES DE COMBUSTION ET LES CHALEURS SPÉCIFIQUES DES GAZ AUX TEMPÉRATURES ÉLEVÉES.

CHAPITRE I.

PREMIÈRE SÉRIE D'EXPÉRIENCES AVEC LE MANOMÈTRE DEPREZ.

CHAPITRE II.

DEUXIÈME SÉRIE D'EXPÉRIENCES AVEC LE MANOMÈTRE ENREGISTREUR BOURDON.

PREMIÈRE PARTIE.

PROCÉDÉS D'OBSERVATION.

DEUXIÈME PARTIE.

RÉSULTATS DES OBSERVATIONS.

2° ÉTUDE DE LA PÉRIODE DE PROPAGATION.

III. — Pressions développées par la combustion et températures de combustion.

IV. — Chaleurs spécifiques des gaz.

CHAPITRE III.

NOTE

SUR UN ACCIDENT

SURVENU LE 12 JUILLET 1883

AU PUITS DES ROSIERS

(CONCESSION DE QUARTIER-GAILLARD, LOIRE.)

Le 12 juillet 1883, le piqueur Portes, du puits des Rosiers, concession du Quartier-Gaillard (Loire), a été brûlé par les flammes d'un coup de mine, dans des circonstances qui présentent un certain intérêt. Cet ouvrier était employé, ainsi que son camarade Blanc, à l'avancement d'une remonte située dans le banc supérieur de la huitième couche, à l'étage moyen des travaux. La remonte avait 8 mètres de longueur et une largeur de 3 mètres; la puissance du banc supérieur dans la région est de 2 mètres, et son inclinaison de 18°.

L'abatage avait lieu à la poudre, à cause de la nature du charbon, nerveux et très dur. A $0^m,80$ du parement de gauche et à $0^m,90$ du toit, le piqueur Blanc avait percé un coup de mine A dont la direction prolongée venait, comme l'indique le croquis (Pl. XVIII, *fig.* 2), passer très près de l'angle de droite de l'entrée de la remonte. Le coup, profond de 1 mètre environ, fut chargé de 375 grammes de poudre, recouverts de 30 à 40 centimètres d'un bour-

rage charbonneux ramassé sur la sole du niveau ; vers onze heures un quart, il était chargé et amorcé, et les deux ouvriers se retirèrent dans le niveau, Blanc au point B, Portes au point P, pendant que le sous-gouverneur Januel, spécialement chargé de ce service, restait pour procéder à l'allumage.

Le sous-gouverneur, après avoir visité le chantier avec sa lampe de sûreté et s'être assuré qu'il ne contenait pas trace de gaz, mit le feu à l'étoupille et se retira en J dans un travers-bancs voisin. Quelques instants après, une violente détonation se faisait entendre, en même temps que des flammes abondantes se répandaient dans le niveau, remontaient le courant d'air et allaient brûler le piqueur Portes placé en amont, à 10 mètres de l'entrée de la remonte. D'après le témoin Blanc, les flammes présentaient une coloration rouge et contenaient, en assez grande quantité, de petites escarbilles incandescentes. En outre Portes a été brûlé sur toute la partie droite du corps, tournée du côté de la remonte, et non sur la partie gauche; la tête qui, au moment de l'accident, était abritée par le bras droit, relevé et appuyé sur un chapeau du cadre, a été préservée.

La marche des flammes contre le courant d'air éveilla, dès l'abord, l'idée que le grisou avait dû jouer un rôle dans l'accident; bien que le banc supérieur de la huitième couche n'eût jamais donné de gaz au puits des Rosiers, on regardait pourtant le quartier comme éventuellement grisouteux à cause de la communication avec le banc inférieur, distant de quelques mètres, et dans lequel la présence du grisou a été constatée de la façon la plus certaine. C'est pour cette raison que les lampes de sûreté ont été adoptées et que l'allumage des coups de mine est confié à un homme spécial, chargé de faire une visite préalable du chantier, à l'aide de la lampe Mueseler.

Comme on va le voir, l'examen du chantier et des cir-

constances de l'accident conduit à rejeter la supposition de la présence du grisou.

En premier lieu, il fut impossible de découvrir, pendant les journées qui suivirent le 12 juillet, la moindre trace de gaz dans la remonte, dans le niveau et même dans les chantiers voisins, tant du banc supérieur que du banc inférieur. D'autre part, le coup de mine avait été retrouvé intact, sauf un très léger écornement à l'entrée, et une nouvelle hypothèse se présentait, celle du débourrage du coup.

L'examen des bois montrait que les flammes avaient occupé l'espace représenté sur le croquis (Pl. XVIII, *fig.* 2) par les hachures croisées; les trois cadres les plus rapprochés du front de taille ne présentaient aucune marque de brûlure, tandis que les suivants portaient des grains de coke frittés, ainsi que des exsudations résineuses, surtout dans le voisinage du parement de droite de la remonte, c'est-à-dire dans le prolongement de la direction du coup. Au point R, où cette direction venait rencontrer le parement du niveau, en une région où se trouvait le remblai d'une ancienne remonte, on distinguait une quantité notable de poussières frittées et d'exsudations sur les bois contenus dans le remblai. En remontant le courant d'air dans le niveau, on les apercevait encore assez nettement sur les cadres de ce niveau, surtout du côté gauche de celui-ci. Ces témoins se trouvaient répartis à peu près également sur les faces amont et aval des bois.

Il n'y avait certainement pas de gaz dans le niveau au moment de la déflagration; en effet, on a exploré minutieusement une cloche située en M, et constaté que les bois de son quadrillage n'avaient pas été atteints. Ils portaient encore, à la partie supérieure, de petits dépôts absolument intacts de poussières fines, ce qui n'aurait évidemment pas eu lieu si cette cloche et les intervalles des chapeaux avaient été remplis de grisou.

La supposition d'un dégagement instantané au front de

taille, coïncidant avec le débourrage du coup, ne se soutient pas davantage. M. l'ingénieur des mines Laurans a, pour la contrôler, fait pousser l'avancement de la remonte, sans employer la poudre, jusqu'au delà du fond du trou, en même temps qu'on creusait le toit en forme de cloche, pour recevoir le gaz capable de se dégager. On n'en a pas aperçu pendant ce travail, qui a été suivi avec le plus grand soin, et le massif a été trouvé très sain et dénué de cavités ou d'accidents d'où aurait pu s'échapper un dégagement instantané.

Toute explication basée sur la présence du grisou étant écartée, on se trouve en présence de la suivante.

Le coup de mine, fortement chargé et percé dans un charbon très dur, a fait canon ; les gaz de la poudre, ainsi que ceux produits par l'inflammation du bourrage, ont formé un cône de projection qui est venu frapper contre la paroi d'en face du niveau, pour rebondir vers le Nord, à cause de sa direction oblique et de la faible vitesse du courant d'air ($0^m,50$ à $0^m,60$). Au moment où le jet de flamme arrivait dans le niveau, il a dû se produire un tourbillon qui a soulevé les poussières assez abondantes de la sole et leur a permis de s'enflammer plus ou moins.

Il est à noter que cette région de la mine est poussiéreuse, chaude et très sèche.

A l'appui de cette manière de voir, on peut citer une expérience faite par MM. les ingénieurs de la mine quelque temps après l'accident. Un coup de mine, percé dans la paroi d'une galerie au rocher (grès dur), chargé de 375 grammes de poudre et bourré avec du poussier pris dans le chantier de l'accident, a fait canon et s'est réfléchi contre la paroi opposée, les gaz et les matières entraînées suivant un chemin tout à fait semblable à celui qui avait été suivi par le jet de flamme du 12 juillet, ainsi qu'on s'en est assuré à l'aide de témoins en papier.

L'accident qui vient d'être relaté est une preuve de plus

de ce fait déjà connu, que les flammes d'un coup de mine peuvent, en présence de poussières de charbon, s'étendre à une distance assez considérable ; dans le cas présent occupe, elles ont parcouru 8 mètres dans la remonte et 12 mètres au moins dans le niveau avec un changement brusque de direction. Afin d'éviter le renouvellement d'accidents de personnes dus à une étendue pareille des flammes, il a été convenu avec les ingénieurs de la mine qu'ils prendraient à l'avenir les mesures ci-après :

1° Éviter les charges de poudre trop fortes, ainsi que les bourrages charbonneux ;

2° Faire retirer les ouvriers dans le niveau, à une trentaine de mètres de distance au moins, au moment de l'allumage des coups.

L'arrosage présente des difficultés pratiques à cause desquelles on n'a pas cru devoir le recommander, en l'absence du grisou.

BULLETIN

DES ACCIDENTS ARRIVÉS DANS L'EMPLOI DES APPAREILS A VAPEUR

PENDANT L'ANNÉE 1882.

DATE de l'accident.	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé.	NATURE forme et destination de l'appareil — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'accident.	CONSÉQUENCES de l'accident.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident.
6 janvier..	Fabrique de sucre à Pont-l'Évêque (Oise).	Chaudière horizontale cylindrique avec deux bouilleurs. — Longueur du corps $8^m,90$; diamètre $1^m,20$; capacité totale 16 m. c. 922.	Corps principal déchiré en pleine tôle dans la première virole, suivant une ligne de $0^m,70$ de longueur, à partir de l'autel, c'est-à-dire dans la partie chauffée à feu nu. La tôle s'est fendue sous la pression ordinaire.	Un ouvrier tué.	Défaut d'alimentation. — Appareils indicateurs de niveau dans des conditions défectueuses.
10 janvier..	Filature à Lille (Nord).	Générateur semi-tubulaire. — Corps tubulaire en fer, deux bouilleurs en fer, 26 tubes en laiton et cuivre rouge. — Longueur du corps $4^m,30$; diamètre $1^m,34$; capacité 9 m. c. 450.	Le troisième tube de la rangée supérieure s'est rompu donnant issue à un mélange d'eau et de vapeur qui est sorti par les portes du foyer. La cassure avait $0^m,70$ de longueur, les fragments avaient disparu laissant une large solution de continuité.	Trois ouvriers grièvement brûlés; deux d'entre eux ont succombé. (La gravité des conséquences a été peut-être accrue par la disposition du local contenant les chaudières).	Défaut d'alimentation. — (Absence de ligne d'eau).
11 janvier..	Blanchisserie à Erquinghem-sur-la-Lys (Nord).	Cylindre sécheur en cuivre rouge avec fonds en fonte. — Longueur $1^m,34$. — Diamètre $0^m,44$; épaisseur 1m/m 5. — La vapeur arrive par un tourillon; la vapeur et l'eau condensée s'échappent par l'autre. — Les dix tuyaux de décharge de dix sécheurs se réunissent sur un collecteur unique. — La section totale de décharge des dix sécheurs est de 2 c. q. 55. — Chaque cylindre portait un robinet de vidange qu'on ne pouvait manœuvrer que pendant l'arrêt. — On avait ainsi purgé	On venait d'arrêter le mouvement de rotation des sécheurs quand l'explosion s'est produite. — Huit cylindres déplacés et avariés. — Deux autres déchirés en plusieurs morceaux.	Un ouvrier tué; un autre brûlé et blessé peu grièvement	Conditions défectueuses d'établissement. (Insuffisance du tuyau d'évacuation; absence de soupape de sûreté). — Épaisseur sensiblement réduite par l'usure. — Pas d'épreuve.

		3 heures avant l'explosion. — Timbre de la chaudière alimentaire 6 k.			
11 janvier. .	Atelier de forges au Havre (Seine-Inférieure).	Chaudière verticale cylindrique à fond plat, formée d'une enveloppe extérieure et d'un tube intérieur concentrique servant de cheminée à un four à réchauffer. — L'eau est contenue entre les deux cylindres.— Diamètre du cylindre extérieur 1m,28.—Diamètre du cylindre intérieur 0m,62 ; hauteur de la chaudière 9m,87. — Partie tronconique à la base de la cheminée. Revêtement en briques sur 3m de hauteur à la base et sur 2m,50 de hauteur à la partie supérieure non baignée par l'eau. — Dernière épreuve en 1880, après réparation et élévation du timbre à 5 k. La chaudière fonctionnait rarement.	A la seconde virole en montant le tube intérieur s'est déchiré; la déchirure suit d'abord à 2 ou 3 centimètres la ligne verticale des rivets sur 0m,96 de longueur, puis elle se prolonge horizontalement sur 0m,55 de part et d'autre de la clouure verticale. Au-dessus de la partie fendue, la tôle s'est emboutie à l'intérieur de la cheminée	Huit hommes grièvement brûlés ; sept d'entre eux ont succombé.	Usure de la tôle du tube intérieur dont l'épaisseur, primitivement de 10 m/m, n'est plus que de 6 m/m.
23 janvier. .	Distillerie à Lyon (Rhône).	Chaudière verticale à foyer extérieur, chauffée sur le fond et sur les côtés.— Hauteur 1m,00 ; diamètre, 0m,62 ; épaisseur 0m,004.— Épreuve en 1872 ; timbre 2 k. 500. — Fond circulaire reposant par ses bords sur la maçonnerie.	Rupture autour du fond plat de la chaudière ; la ligne de rupture suit la partie emboutie de la tôle sur toute la circonference. Chaudière lancée ; elle est retombée à 22 m. de distance.	Mur renversé.	Corrosions ayant enlevé toute résistance à l'appareil. (Des fuites ont maintenu humide la maçonnerie sur laquelle repose l'appareil, ce qui a produit une diminution d'épaisseur de la tôle qui, de 4 m/m, est tombée à 2 m/m, 1 m/m et même 0 en un certain point).
1er février .	Huilerie à la Seyne (Var).	Chaudière cylindrique à section ovoïde, foyer intérieur, retour de flammes par 16 tubes. — Trous de vidange elliptiques de 0m,09 sur 0m,07.— On n'avait pas pu employer d'autoclaves pour ces portes parce qu'elles se trouvaient percées trop près de l'extrémité des parois planes ; on avait adapté une fermeture extérieure au moyen d'une plaque traversée par un boulon avec tête en forme de T. — La plaque était maintenue par un écrou prenant le boulon.	A la pression de 1 k. on voulut serrer l'écrou de l'une des portes, l'écrou se rompit et l'eau bouillante, sortant par l'orifice, jaillit sur les deux hommes occupés au serrage.	Deux hommes tués. (La gravité des conséquences a été peut-être accrue par la disposition des appareils au voisinage des chaudières).	Emploi d'un boulon avarié pour maintenir la porte de vidange, et imprudence commise en resserrant l'écrou sans avoir fait entièrement tomber la pression.

DATE de l'accident.	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé.	NATURE forme et destination de l'appareil. — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'accident.	CONSÉQUENCES de l'accident.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident.
7 février...	Bateau « *Ravensdown* » à Rochefort (Charente-Inférieure).	Chaudière cylindrique à deux foyers intérieurs et retour de flammes tubulaire.— Boîte à feu commune aux deux foyers. — Face arrière par tôle emboutie sur ses bords.	En marche, une ouverture elliptique de $1^m,50$ sur $0^m,65$ s'est faite à la partie inférieure de la face arrière de la chaudière.	Deux hommes tués; deux autres ont été brûlés à la barre.	Amincissement de la tôle de l'enveloppe avec rupture préalable de plusieurs entretoises de la lame d'eau. (L'accident aurait eu des conséquences moins graves si la face arrière eût été mieux armée).
22 février..	Papeterie à Docelles (Vosges).	Lessiveur cylindrique à fonds légèrement tronc-coniques.— Longueur $2^m,20$.— Diamètre $1^m,60$. — Cornière circulaire réunissant les fonds au cylindre par une rivure double.— Des deux tourillons l'un contenait la conduite d'admission, l'autre communiquait avec un tuyau d'échappement de $0^m,04$, inférieur à celui de la conduite d'amenée.— Dernière épreuve en 1880.—Timbre 3 k.500.— Chaudière alimentaire timbrée à 5 k. 500. — Pas de soupape de sûreté.	Le lessiveur s'est partagé en trois morceaux. L'une des cornières avait été fendue en deux sur toute sa circonférence, l'autre sur une moitié seulement du pourtour.	Un ouvrier légèrement atteint. Dégâts matériels.	Excès de pression et conditions défectueuses de construction. (Insuffisance de section des fers d'angle reliant les fonds à la partie cylindrique, eu égard à la fatigue qu'ils subissent du fait de la rotation).
4 mars.....	Teinturerie à St-Pierre-lès-Calais(Pas-de-Calais)	Récipient dit barbotteur. — Cylindre de $1^m,15$ de diamètre et $0^m,60$ de longueur avec calottes hémisphériques. — Il est fixe avec son axe incliné. — Ni épreuve ni soupape de sûreté.	Une tôle s'est ouverte en haut de la partie cylindrique; déchirure principale de $0^m,50$ de longueur parallèle à la rivure de la calotte et distante d'elle de 5 centimètres; quelques déchirures secondaires perpendiculaires.	Un ouvrier légèrement brûlé.	Faible épaisseur e laissant pas de marge pour l'usure.— Amincissement de la tôle par suite des corrosions produites par des fuites d'eau d'une conduite supérieure; le métal restant était altéré.
14 mars....	Papeterie à Jouy-sur-Morin (Seine-et-Marne).	Lessiveur cylindrique en tôle de $1^m,65$ de longueur et $1^m,48$ de diamètre à fonds sphériques de $0^m,45$ de flèche. — Le corps relié aux fonds par une cornière intérieure avec un rang de rivets sur chaque aile. — Rotation autour de	Le fond du lessiveur s'est détaché brusquement par la rupture de la cornière près de l'arête. — Le fond a fait brèche dans un mur de $0^m,60$. — Le corps a traversé un autre mur de $0^m,60$.	Quelques dégâts matériels	L'explosion, préparée par un long usage, un défaut d'entretien et un mode d'assemblage insuffisant des fonds au cylindre, a été déterminée par un excès de pression dû à l'insuffisance de section des orifices d'évacuation.

		deux tourillons dont l'un donnait accès à la vapeur et l'autre servait à évacuer la lessive et la vapeur. — Timbre probable 2 k. (illisible). — Très ancienne épreuve. — Chaudière alimentaire timbrée à 5 k. — Section du tuyau d'arrivée de vapeur 28 c. q. — Section du tuyau d'échappement et de la soupape de sûreté 7 et 11 c. q.			
19 mars....	Raffinerie à Paris.	Récipient cylindrique vertical de $2^m,50$ de hauteur sur $2^m,20$ de diamètre. — Pas d'épreuve — Une soupape de sûreté pouvant être séparée de l'appareil par la manœuvre d'un robinet.	Le fond supérieur s'est soulevé en restant fixé d'un côté au cylindre.	Un ouvrier légèrement brûlé. Quelques dégâts matériels.	Excès de pression qui a pu se produire par suite d'une disposition défectueuse ; l'appareil pouvait être isolé de la soupape destinée à y limiter la pression.
4 avril.....	Fabrique de noir animal au Bourget (Seine).	Récipient cylindrique de $1^m,65$ de hauteur et $1^m,12$ de diamètre avec double fond perforé à 6 centimètres du fond plein. — Deux orifices : l'un, de $0^m,36$ de diamètre, se ferme au moyen d'un tampon appliqué contre les bords par une vis de pression à poignée et dont l'écrou est formé par une barrette en fer forgé fixée à deux oreilles que porte la tubulure.	Un ouvrier, après avoir fermé l'admission, voulut resserrer le joint en agissant sur la poignée de la vis au moyen d'une forte clef servant de levier, mais la barrette se brisa et le tampon fut projeté.	Un ouvrier brûlé mortellement.	Reste de pression par suite de l'obstruction du tuyau d'évacuation. — Ce reste de pression aurait été très faible s'il y avait eu une soupape de sûreté.
11 avril....	Exploitation agricole à Crépy-en-Laonnois (Aisne).	Chaudière à deux bouilleurs inférieurs et flamme descendante. — Timbre 5 atm.	Déchirure de la tôle supérieure du bouilleur de gauche en arrière de la première communication ; il s'est fait une ouverture rectangulaire de $0^m,37$ sur $0^m,41$.	Chauffeur légèrement brûlé.	Corrosion externe des bouilleurs par suite d'humidité dans les carneaux.
31 mai.....	Bateau « *J. B. Say* » au Hâvre (Seine-Inférieure).	Générateur cylindrique à foyer intérieur muni de 116 tubes en laiton de 75 m/m de diamètre. — Un d'eux, enlevé pour cause de fuite le jour de l'accident, avait été remplacé par un tirant de $2^m,11$ de longueur et 21 m/m de diamètre, fileté à ses deux bouts et reliant les deux bouchons en fer qui remplissaient les deux trous des plaques à tubes.	Le tirant s'est rompu suivant un des filets de la vis, côté de la boîte à feu, les bouchons ont été déplacés et l'eau chaude a été projetée par les orifices.	Deux mécaniciens atteints par la vapeur et l'eau bouillante.	Rupture d'un tirant à vis placé pour remplacer un tube et dont le métal a présenté un défaut au filet de la vis.

DATE de l'accident.	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé.	NATURE forme et destination de l'appareil. — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'accident.	CONSÉQUENCES de l'accident.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident.
5 juin	Laboratoire d'expériences à Paris.	Chaudière cylindrique en cuivre rouge noirci extérieurement, et entourée d'un manchon en verre sur la partie de sa longueur qui reçoit les rayons concentrés par un réflecteur parabolique. — Deux appareils semblables étaient montés sur un même support.	La chaudière se divisa en deux fragments ; l'un fut projeté d'un côté et retomba aplati ; l'autre, comprenant le reste du corps cylindrique coupé au ras de la collerette inférieure et fendu suivant une génératrice, alla tomber dans un jardin voisin.	Un ouvrier légèrement blessé.	Excès de pression par suite de la fermeture de l'issue laissée à la vapeur vers la soupape de sûreté.
6 juin	Scierie à Beaufort (Nord).	Chaudière cylindrique horizontale de $2^m,65$ de longueur et $0^m,70$ de diamètre. — Dernière épreuve en septembre 1881. — Timbre 4 k. Chaudière chauffée d'abord en-dessous, puis latéralement par deux carneaux parcourus successivement par les gaz chauds.	La chaudière s'est rompue en nombreux fragments.	Le chauffeur tué ; le propriétaire légèrement blessé. Incendie de la scierie.	Défaut d'alimentation.
17 juin.....	Fonderie à la Fère (Aisne).	Chaudière verticale à foyer intérieur prolongé par des tubes jusqu'à une plaque tubulaire qui termine la chaudière proprement dite ; au-dessus de cette plaque est une cheminée conique. — Diamètre des tubes 9 centimètres.	Un des tubes s'est détaché des deux plaques tubulaires et a été lancé verticalement hors de la chaudière. (Ce tube avait été remis en place huit jours avant l'accident).	Chauffeur brûlé aux jambes. Dégâts matériels peu considérables.	Tube mal ajusté ou trop étroit ou insuffisamment serré ou mandriné.
24 juin.....	Location de force motrice à Paris.	Chaudière horizontale à bouilleurs. — Epreuve en 1877. — Timbre 5 k.	Le bouilleur de gauche s'est ouvert a $0^m,90$ de la tête sur $0^m,70$ de longueur et suivant une ligne située à $0^m,20$ de hauteur, du côté intérieur, au-dessus de la génératrice inférieure.	Le chauffeur brûlé gravement a succombé.	Défaut d'alimentation.
5 juillet....	Papeterie à Godoncourt (Vosges).	Chaudière cylindrique horizontale à deux bouilleurs de $0^m,50$ de diamètre. — Timbre 5 k. 500. — Dernière épreuve	Le bouilleur de droite présentait une déchirure de $0^m,80$ de développement, suivant une courbe presque tangente	Néant.	Cause inconnue.

		en mars 1882.	à la ligne horizontale des rivets.		
6 juillet....	Equarrissage à Aubervilliers (Seine).	Récipient cylindrique vertical avec double fond en tôle perforé. — Alimentation par un générateur qui correspond à deux récipients et est timbré à 5 k., tandis que le récipient ne peut fonctionner qu'à 3 k.	Le cylindre s'est déchiré horizontalement, soit suivant la clouure des fonds, soit sur les lignes d'emboutissage; les déchirures verticales se sont faites en pleine tôle.	Dégâts matériels.	Vétusté et état d'usure de l'appareil. (En l'absence de soupape, la pression a pu s'élever jusqu'à 5 k.).
1er août....	Chemin de fer au Cheylas (Isère).	Chaudière verticale de grue locomobile avec foyer intérieur et 64 tubes Field. — Cheminée intérieure centrale de $0^m,20$ de diamètre, en cuivre étiré. — L'échappement de vapeur débouche horizontalement dans la cheminée au-dessus de la chaudière. — Epreuve en 1879. — Timbre 9 k.	Il s'est fait dans le tube-cheminée une déchirure de $0^m,20$ de longueur suivant la génératrice; le métal s'est replié en dedans de part et d'autre.	Le mécanicien a été projeté et légèrement blessé.	Usure rapide d'un seul côté de la cheminée; cette usure intérieure a été produite par le frottement des cendres et l'inégalité ne paraît provenir que de la direction du jet. (Le tube n'avait peut-être pas à l'origine une épaisseur uniforme).
4 août... .	Coutellerie à Foulain (Haute-Marne).	Chaudière cylindrique horizontale avec foyer intérieur cylindrique, boîte à fumée de même forme et 47 tubes en cuivre. — Longueur du corps $3^m,98$. — Diamètre du corps $0^m,875$. — Timbre 6 k. Cette machine était en location.	La tôle de la boîte à fumée s'est déchirée au moment de l'arrêt de la machine.	Néant.	Corrosion des tôles de la boîte à fumée par la pluie s'introduisant par la cheminée.
7 août	Papeterie à Miribel-les-Echelles (Isère).	Groupe de deux chaudières horizontales avec foyer intérieur et réservoir de vapeur. — La plus grande a une capacité de 13 m. c., la plus petite une capacité de 7 m. c. — La plus grande chaudière a 9^m de longueur et $1^m,64$ de diamètre extérieur. — Dernière épreuve pour les deux appareils en novembre 1880.	La grande chaudière, divisée en plusieurs morceaux, a été projetée; les fragments ont été retrouvés à des distances variables et jusqu'à 83^m de l'emplacement primitif. — La petite chaudière a été lancée sans que sa tôle fût déchirée.	Trois ouvriers atteints mortellement. Dégâts matériels considérables.	Corrosion d'une bande étroite et allongée comprise au milieu de la partie inférieure de la chaudière qui reposait sur un petit mur. (Sol et maçonnerie humides).
17 août....	Exploitation agricole à Lécousse (Ille-et-Vilaine).	Chaudière locomobile horizontale cylindrique de 2^m de longueur et $0^m,70$ de diamètre avec foyer intérieur et 22 tubes en laiton.	Les deux fonds ont été projetés à une petite distance, mais les parties latérales et supérieures ont été déchirées et lancées en tout sens.	Quatre personnes tuées et quatre autres plus ou moins grièvement blessées.	Excès de pression. (Soupapes calées et manomètre ne fonctionnant pas).
22 août....	Blanchisserie à Gisors (Eure).	Cuve chauffée par la vapeur.— Hauteur $3^m,05$; diamètre $2^m,98$. — Deux fonds bombés. Le générateur qui l'ali-	Tout l'appareil, sauf le fond, a été projeté en l'air, brisant un plancher et un escalier; le fond s'était détaché le long	Un ouvrier tué. Dégâts matériels.	Insuffisance des orifices d'évacuation permettant à la vapeur d'acquérir une pression à laquelle l'appareil ne pou-

DATE de l'accident.	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé.	NATURE forme et destination de l'appareil. — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'accident.	CONSÉQUENCES de l'accident.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident.
		mento est timbré à 5 k. — Moyens d'échappement insuffisants.	de la rivure circulaire inférieure ; la tôle était profondément corrodée dans les parties du fond qui reposaient sur la maçonnerie et n'étaient pas visibles.		vait pas résister. — Profonde corrosion à la base en contact avec un support en maçonnerie souvent humide.
25 août....	Fabrique de conserves de sardines à Quiberon (Morbihan).	Chaudière composée de trois bouilleurs en fer de 2m,25 de longueur et 0m,15 de diamètre. — Timbre 30 k. — Les flammes vont de l'avant à l'arrière sous une voûte qui recouvre les deux bouilleurs d'en bas, elles reviennent en avant en chauffant le bouilleur d'en haut et les serpentins ou tubes de communication.	Un des bouilleurs inférieurs s'est déchiré le long de la ligne de brasure sur 0m,25 environ ; aux deux extrémités les déchirures en travers ont une dizaine de centimètres de longueur.	Un ouvrier mort des suites de ses brûlures.	Traces d'un ancien coup de feu et de fissures.
30 août....	Battage de grains à Brie (Deux-Sèvres).	Chaudière locomobile cylindrique, tubulaire, horizontale, à foyer intérieur. — 29 tubes, partie en cuivre rouge et partie en laiton. — Timbre 10 k.	L'enveloppe du foyer a été brisée en un grand nombre de fragments jetés au loin dans toutes les directions.	Quatre personnes tuées et deux autres blessées ; l'une de ces dernières a succombé.	Usure de la tôle de l'enveloppe cylindrique à sa base.
30 août....	Bateau « *la Meuse* » à Ajaccio Corse).	Chaudière à trois foyers intérieurs et à tubes de retour	Une déchirure s'est produite à la jonction du foyer avec la plaque verticale de la boîte à feu. — Après ce déchirement le foyer s'est considérablement affaissé.	Trois hommes tués.	Cause inconnue.
31 août....	Fabrique de draps à Reims (Marne).	Bassine à double fond de 0m,70 de diamètre sur 0m,65 de hauteur ; le double fond est constitué sur toute la surface par une pièce de forme pareille soudée à l'arête supérieure et laissant entre les deux parois un vide de 5 centimètres de largeur en-	Le double fond de la bassine s'est retourné et ouvert.	Un enfant brûlé assez sérieusement.	Excès de pression, l'appareil ayant été mis en communication avec un générateur produisant la vapeur à 4 ou 5 k., quand il n'était timbré que pour la pression de 0 k. 5 et sans aucun moyen efficace de la maintenir dans cette limite.

		viron. — Eprouvée pour le timbre de 0 k. 5. (Capacité de moins de 100 litres).			
2 septembre.	Chantier de travaux (pont) près Cagnes (Alpes-Maritimes).	Chaudière de locomobile cylindrique avec foyer prismatique.	La chaudière a été brisée en plusieurs fragments. — La tôle s'est d'abord ouverte suivant la génératrice inférieure. Elle est corrodée et usée au voisinage de la ligne de rupture, son épaisseur étant réduite en certains points de 8 m/m à moins de 3 m/m.	Un ouvrier tué. — Le mécanicien a reçu des brûlures et des contusions assez graves. — Deux manœuvres ont été légèrement blessés.	Etat d'usure de la chaudière. — Il est possible que l'accident, devenu imminent même sous la pression ordinaire, ait été déterminé par un excès de pression provenant de la surcharge des soupapes.
3 octobre...	Mines à Roche-la-Molière (Loire).	Chaudière cylindrique horizontale à foyer extérieur avec un bouilleur inférieur. — La grille étant placée sous la chaudière proprement dite et le bouilleur étant diminué d'autant, son fond d'avant forme l'extrémité d'arrière du cendrier. — La sole de ce cendrier se trouve à $0^m,10$ au-dessus du bas du bouilleur dont un segment est caché par la maçonnerie. — Longueur du corps $12^m,50$; diamètre $1^m,35$.— Longueur du bouilleur $10^m,40$. — Diamètre $1^m,00$. — Dernière épreuve en 1880. — Timbre 4 k. 500.	Peu après l'arrêt, une alimentation, la couverture des feux et la fermeture des registres, le fond d'avant du bouilleur a été projeté en avant pour retomber à 20^m, le reste de la chaudière reculant de $2^m,00$.	Un ouvrier blessé mortellement ; trois autres légèrement atteints.	Corrosion du fond embouti qui était engagé dans la maçonnerie du cendrier, maintenue humide par l'eau qu'on y jetait lors des décrassages.
19 octobre..	Forges à Ferrière-la-Grande (Nord).	Chaudière horizontale cylindrique avec deux bouilleurs. —Longueur du corps $12^m,00$. — Diamètre $1^m,50$. — Longueur des bouilleurs $10^m,20$. — Diamètre $0^m,75$.— Timbre 5 atm. — Chauffage par les flammes perdues de deux fours de chaufferie.	Le bouilleur de gauche s'est déchiré sur $2^m,60$ de longueur, depuis son extrémité jusqu'à la première communication, avec projection au loin des débris de la partie déchirée.	Trois ouvriers tués ; huit autres atteints peu grièvement.	Quelques profondes corrosions extérieures produites à la partie inférieure du bouilleur dans une région emprisonnée dans la maçonnerie.
4 novembre.	Minoterie à Haubourdin (Nord).	Chaudière horizontale cylindrique avec deux bouilleurs inférieurs. — Longueur du corps $2^m,50$; diamètre $0^m,80$; longueur des bouilleurs $2^m,90$; diamètre $0^m,45$. — Timbre 5 atm.	Le corps principal s'est ouvert suivant la génératrice supérieure en se développant de part et d'autre après l'arrachement des deux fonds.	Le propriétaire blessé; son fils légèrement atteint.	Affaiblissement de l'arête supérieure du corps cylindrique par les solutions de continuité beaucoup trop nombreuses que l'on y avait pratiquées et par la rupture ancienne de l'anneau en fonte du trou d'homme, prolongée par une fissure longitudinale dans la tôle.

DATE de l'accident.	NATURE et situation de l'établissement où l'appareil était placé.	NATURE forme et destination de l'appareil. — Détails divers.	CIRCONSTANCES de l'accident.	CONSÉQUENCES de l'accident.	CAUSE PRÉSUMÉE de l'accident.
7 décembre.	Usine pour le traitement des matières résineuses à Roquefort (Landes).	Chaudière cylindrique de $0^m,50$ de diamètre et $2^m,00$ de longueur. — Un des fonds est bombé en tôle, l'autre en fonte. — Ancien timbre 5 k. — Réparation. — Nouveau timbre 3 k. à la dernière épreuve en 1880.	La chaudière s'est partagée en plusieurs fragments ; la brisure principale passe par la ligne de jonction des tôles inférieure et supérieure ; aucun rivet n'a cédé ; c'est partout la tôle supérieure qui s'est déchirée. — (La veille de l'accident une fissure s'était produite et avait été bouchée avec du plomb ; elle est comprise dans l'une des lignes principales de rupture).	Néant.	Mauvais état de la chaudière. — Usure ou corrosion. — Fissure déclarée la veille de l'accident.
13 décembre	Forges à Ivry (Seine).	Chaudière verticale chauffée par les flammes perdues d'un four à réchauffer. — Hauteur $13^m,30$.	La partie inférieure, sur une hauteur de $5^m,20$, est restée sur place, tandis que les deux viroles suivantes, de $1^m,00$ de hauteur chacune, se sont largement ouvertes suivant la clouure verticale, détachées partiellement du fragment inférieur et complètement du fragment supérieur ; enfin ce dernier, de $6^m,10$ de hauteur, est tombé avec la cheminée en briques.	Un ouvrier contusionné sans gravité. Dégâts matériels importants.	Manque d'eau.
25 décembre	Distillerie à Bourbourg (Nord).	Chaudière horizontale cylindrique avec deux bouilleurs et deux réchauffeurs. — Longueur du corps $7^m,30$; diamètre $1^m,40$. — Longueur des bouilleurs $9^m,50$; diamètre $0^m,85$. — Dernière épreuve en 1879. — Timbre 6 k. — Les flammes chauffent d'abord la partie inférieure des bouilleurs, puis successivement les deux flancs du corps cylindrique, enfin les réchauffeurs.	La tôle du coup de feu du bouilleur de droite s'est ouverte brusquement en tournant autour de la rivure comme charnière et venant s'appliquer contre le bouilleur de gauche. — La ligne de cassure s'est prolongée dans la rivure des deux tôles qui recouvraient celles du coup de feu.	Un ouvrier légèrement brûlé.	Formation d'une épaisse couche de boue dans la région du coup de feu.

29 décembre	**Scierie** à Vierzon-Ville (Cher).	**Chaudière cylindrique horizontale avec deux bouilleurs-réchauffeurs latéraux superposés.** — Corps : diamètre $0^m,90$; longueur $4^m,40$. — Bouilleurs : diamètre $0^m,60$; longueur $4^m,40$. — Le foyer est sous le corps de chaudière. — Les gaz, après avoir chauffé la moitié inférieure du corps, longent le bouilleur supérieur, puis le bouilleur inférieur. — Épreuve en 1880. — Timbre 6 k.	Le bouilleur supérieur s'est rompu en trois fragments. Nombreuses déchirures sur la première virole ; la seconde s'est seulement ouverte suivant sa ligne de rivure longitudinale.	Dégâts matériels considérables.	La rupture est due en grande partie à la mauvaise qualité de la tôle. — Les causes accessoires n'ont pu être mises en évidence par l'enquête, l'ingénieur n'ayant eu connaissance de l'accident que longtemps après sa date.

RÉSUMÉ.

RÉPARTITION DES ACCIDENTS.

	NOMBRE.	TUÉS.	BLESSÉS (1)
I. — Par nature d'établissements :			
Bateaux	3	5	2
Blanchisseries	2	2	»
Chemin de fer	1	»	»
Conserves (Fabrique de)	1	1	»
Coutellerie (Fabrique de)	1	»	»
Distilleries	2	»	»
Drap (Fabrique de)	1	»	1
Equarrissage	1	»	»
Exploitations agricoles	3	9	6
Filature	1	2	1
Fonderie	1	»	1
Force motrice (Atelier de)	1	1	»
Forges (Ateliers de)	3	10	5
Huilerie	1	2	»
Laboratoire	1	»	»
Mine	1	1	»
Minoterie	1	»	1
Noir animal (Fabrique de)	1	1	»
Papeteries	4	3	1
Raffinerie	1	»	1
Résines (Usine de traitement des)	1	»	»
Scieries	2	1	»
Sucre (Fabrique de)	1	1	»
Teinturerie	1	»	»
Travaux (Chantier de)	1	1	1
Totaux	37	40	20
II. — Par espèces d'appareils :			
1° Chaudières sans foyer intérieur :			
Horizontales non tubulaires, avec ou sans bouilleurs	11	7	6
Verticales	3	7	1
2° Chaudières avec foyer intérieur :			
Horizontale non tubulaire	1	3	»
Horizontales plus ou moins tubulaires	8	17	8
Verticales	2	»	1
3° Récipients	9	3	3
4° Divers	3	3	1
Totaux	37	40	20

III. — D'après les causes présumées (2) :

1° Conditions défectueuses d'établissement :	
Construction, disposition, installation ou matières défectueuses	10
2° Conditions défectueuses d'entretien.	
Usure. — Fatigue ou amincissement du métal	15
Réparations non faites ou défectueuses	7
3° Mauvais emploi des appareils :	
Manque d'eau (suivi ou non d'alimentation intempestive)	5
Excès de pression	6
Autres imprudences ou négligences	4
4° Causes restées inconnues	2

(1) On n'a inscrit comme blessés que ceux qui ont eu au moins 20 jours d'incapacité de travail.
(2) Le nombre total des causes présumées est supérieur à celui des accidents, parce que le même accident a été quelquefois attribué à plusieurs causes réunies.

NOTE

SUR

LE BASSIN HOUILLER DE TETE

(RÉGION DU ZAMBÈZE).

Par M. E. LAPIERRE, ingénieur civil des mines.

Dans le cours de l'année 1881, une expédition dont je faisais partie fut envoyée en Mozambique, pour étudier les ressources minéralogiques de la contrée et spécialement les mines d'or et les gîtes de charbon qui y avaient été signalés. De Quilimane, point de débarquement, l'expédition se rendit à Tete, centre du principal gisement houiller, en remontant d'abord la rivière de Quilimane jusqu'à Inhandoa (voir la carte, Pl. XIX, *fig.* 6), puis le Quaqua jusqu'à Mopéa, et enfin le Zambèze après avoir gagné ce fleuve par terre, car il n'y a pas de communication entre lui et la rivière de Quilimane.

A la hauteur de Mopéa, le Zambèze mesure plus de 3 kilomètres de largeur; son lit et ses berges sont exclusivement formés d'un sable fin dans lequel l'examen à la loupe fait découvrir beaucoup de feldspath, des fragments de quartz, de roches amphiboliques, du mica, et du fer oxydulé en très grande abondance; il n'y a pas de traces de calcaire. Au-dessus de Mopéa, le terrain, plat jusqu'alors, devient plus accidenté : on aperçoit des col-

lines qui s'élèvent graduellement jusqu'à la Morumbala, montagne granitique de 1.200 mètres d'altitude, située sur la rive gauche du Chiré. Plus haut, à l'est de Sena, se dressent quelques montagnes abruptes, que leur profil nous a fait supposer d'origine éruptive; en face, sur la rive droite, courent le long du fleuve, très large en cet endroit, une série de collines aux crêtes singulièrement dentelées; la roche qui apparaît sur les berges du Zambèze et qui a fourni les matériaux pour la construction du fort de Sena, est un grès rouge à grain moyennement fin, assez peu micacé, qui ressemble beaucoup à certains grès permiens ou aux grès rouges du trias.

En continuant de remonter le cours du Zambèze, on arrive aux gorges de Lupata, où le fleuve, réduit à une largeur de 200 à 250 mètres, est resserré entre de hautes murailles rocheuses constituées par une sorte de porphyre à pâte amphibolique noire ou verdâtre, dans laquelle sont disséminés des cristaux de feldspath plus ou moins gros; vers le milieu de la gorge apparaît sur la rive droite, s'appuyant contre les roches porphyriques, un grès grisâtre, à grain moyen, peu micacé, que je n'hésite pas à regarder comme du grès houiller. Le grès houiller se montre, du reste, franchement à quelques kilomètres en amont de ces gorges, sur les berges de la Lueynha, rivière tributaire du Zambèze, et on ne le quitte plus jusqu'à Tete. Cette ville est située par 16° 9′ 3″ de latitude australe et 31° 7′ 6″ de longitude orientale, sur la rive droite du Zambèze, dont la largeur y atteint 1.000 mètres à l'étiage. Le sol est formé d'épaisses assises de grès, au milieu desquelles affleurent quelques bancs de schistes noirs ou jaunâtres; il s'élève à partir du fleuve par une série d'ondulations où de rides parallèles au cours de celui-ci, jusqu'à une chaîne de montagnes constituée aussi par du grès houiller, la Serra Karroeira, dont l'altitude absolue ne dépasse pas 250 mètres et dont l'axe est sensiblement dirigé du nord au sud.

Étendue du bassin. — L'étendue qu'occupe la formation houillère le long du cours du Zambèze paraît extrêmement considérable ; nous l'avons vue se poursuivre sans interruption des gorges de Lupata à Tete ; en amont de cette ville, des affleurements de houille existent dans un certain nombre d'affluents de la rive droite du fleuve, le Rio Mufa, l'Inhamoenga, l'Inhacamba et le Cacoudé. Cette dernière rivière coule à 20 lieues de Tete, au-dessous des rapides de Kebrabasa, rapides déterminés par un pointement de roches éruptives.

Au delà des rapides, le docteur Livingstone a rencontré des couches de houille dans les plaines basses de Chicova ; il signale aussi des affleurements de charbon en aval, au village de Mboma sur le Chiré, par 16° 56′ de latitude.

En coordonnant ces observations, on peut très raisonnablement admettre que le bassin houiller existant à Chicova s'allonge parallèlement au Zambèze. Déchiré par les roches éruptives qui ont produit les rapides de Kebrabasa, il reparaît en aval de ces rapides, et vient jusqu'à la chaîne de la Lupata, où il est traversé de nouveau par les porphyres postérieurs qui constituent cette chaîne. En deçà de la Lupata, il disparaîtrait sous les grès rouges permiens ou triasiques de Sena, émergerait ensuite dans la vallée du Chiré, et s'arrêterait contre le massif granitique de la Morumbala. La coupe (*fig.* 7, Pl. XIX) représente cette hypothèse.

Peut-être cependant les terrains houillers de Chicova et du Chiré constituent-ils des bassins indépendants de celui dont Tete occupe le centre ; ce dernier s'arrêterait alors, d'une part à la Lupata, de l'autre à Kebrabasa, suivant le cours du Zambèze sur une étendue de plus de 160 kilomètres.

Je n'ai pas de données suffisantes pour en déterminer la largeur, mais elle doit être considérable, car à la hauteur du point où le Muarase tombe dans le Zambèze, j'en ai

reconnu plus de 40 kilomètres à partir des terrains primitifs qui en forment la limite nord-est, sans que rien indiquât que j'approchais de la limite opposée.

Les recherches géologiques offrent malheureusement, dans de telles régions, des difficultés considérables : absence de routes, souvent même de sentiers ; soleil brûlant rendant les marches extrêmement pénibles ; sol couvert d'une épaisse couche d'humus et d'une végétation luxuriante qui masquent l'affleurement des terrains, de sorte qu'on ne peut apercevoir la roche à nu que sur les berges ravinées des torrents ; enfin, il n'existe, bien entendu, aucune carte détaillée de la région ; celles qui accompagnent la présente note ont été levées par moi à la boussole, par cheminement.

Description du bassin compris entre le Rovugo, le Moatise et le Muarase. — La contrée qui s'étend entre le Rovugo au nord, le Zambèze à l'ouest, le Muarase au sud, et les terrains primitifs à l'est (*fig.* 1, Pl. XIX), occupe une superficie de 330 kilomètres carrés. C'est une plaine parsemée de monticules à pentes douces, dont la hauteur excède rarement 20 ou 25 mètres. Au nord, en face de Chingoso et sur la rive gauche du Rovugo, surgit une montagne plus élevée, formée de porphyres amphiboliques dans lesquels les cristaux de feldspath atteignent souvent d'énormes dimensions. L'altitude absolue de cette montagne est de 280 mètres. Une montagne de même nature, mais bien moins élevée, se rencontre à l'est, sur les bords du ruisseau l'Inhamtoto.

Le terrain houiller occupe toute cette étendue. Il est, comme partout, composé de grès, de schistes et de couches de houille. Les grès sont blancs, bleuâtres, quelquefois, mais rarement, un peu jaunes ; leur texture, leur composition sont analogues à celles des grès houillers de la Loire ou de l'Aveyron. Il en est de même des schistes, qui sont

noirs, gris foncé ou jaunâtres ; quelques-uns sont parsemés de veinules de houille. J'y ai trouvé la flore caractéristique de la formation houillère : des Calamites, des Annularia, plusieurs variétés de Fougères, des Sigillaires, des Cordaïtes, etc. (*).

J'ai remarqué un schiste franchement jaune que j'ai trouvé à 1 ou 2 mètres au toit d'une couche de charbon : il contient une assez forte proportion de chlorure de sodium. Les indigènes, pour qui le sel marin est une denrée rare et précieuse, exploitent ce schiste en plusieurs endroits ; après l'avoir grossièrement pilé, ils le mettent dans des vases en terre à fond percé de petits trous, et versent dessus de l'eau qu'ils recueillent et dont ils extraient le sel par évaporation.

Qualité de la houille. — La houille, qui forme dans ce bassin des couches de puissance très variable, depuis 30 à 40 centimètres jusqu'à 12 et 14 mètres, appartient à la catégorie des houilles demi-grasses à longue flamme ; elle donne au creuset 22 à 25 p. 100 de matières volatiles et un coke assez bien fondu, mais peu dense. Elle brûle avec une flamme claire et longue, qui la rendrait propre au chauffage des chaudières tubulaires. Elle est assez collante pour être employée à la petite forge. L'absence, ou la rareté des pyrites dans ce combustible, rend les cendres très blanches. Malheureusement ces cendres sont très abondantes, et les différentes incinérations que nous avons faites nous en ont constamment donné 12 à 15 et jusqu'à 18 p. 100.

Les assises du terrain houiller sont ordinairement peu inclinées ; les pentes de 10 à 12° sont les plus ordinaires ; ces angles ne sont dépassés qu'au contact des diorites, qui

---

(*) Voir plus loin, p. 594, la note de M. Zeiller sur cette flore.

ont surgi sur plusieurs points, postérieurement à la période houillère.

Diorites. — Ces roches, noires ou vertes, composées de feldspath et d'amphibole, et dont quelques échantillons présentent l'aspect porphyrique, se rencontrent tantôt en filons plus ou moins minces, tantôt elles forment des mamelons arrondis de faible hauteur. On en remarque une masse considérable le long de la ligne qui sépare le terrain houiller du terrain primitif et qui constituait sans doute une ligne de moindre résistance.

J'ai dit que la diorite dont je parle est postérieure au terrain houiller : on ne peut en douter quand on voit, sur les lieux, les bancs de grès violemment relevés contre le filon dioritique, métamorphisés quelquefois par la chaleur de la masse incandescente qui faisait éruption, et les couches de houille brisées et contournées présentant parfois des fragments de charbon transformés en une espèce de coke imparfait. La coupe AB, *fig.* 3, Pl. XIX, représente un accident de cette nature.

Comme substances adventives, on rencontre quelques bancs de fer carbonaté, et, sur bon nombre de points, une grande abondance de morceaux de fer oxydulé magnétique. Nous avons recueilli dans le lit de certains ruisseaux des échantillons de sable pris au hasard, qui en contenaient jusqu'à 40 p. 100.

Couches du Muarase. — Les couches de houille que l'on peut voir dans le lit du Muarase sont assez nombreuses sans doute, mais elles sont bien loin d'avoir l'importance de celles que l'on rencontre sur le Moatise. Je les énumère rapidement.

Si, partant du village de Pondé (*fig.* 1, Pl. XIX), on descend le cours dela rivière, on ne tarde pas à apercevoir les affleurements de quatre couches assez rapprochées les unes

des autres ; la première, la plus puissante, a 2^m,50 à 3 mètres d'épaisseur en un seul banc. La seconde, d'une épaisseur de 4 mètres, compte, séparés les uns des autres par de minces bancs, huit sillons de houille de bonne qualité, dont le plus important a 80 centimètres d'épaisseur ; plus loin on découvre une couche de 1 mètre en un seul banc ; plus loin encore, une veine de 0^m,40 de puissance.

D'autre part, en remontant le Muarase, à partir du même village de Pondé, on voit, au sud de Chipasse, deux affleurements, l'un de 1^m,95, l'autre de 2^m,20 de puissance utile. On marche longtemps ensuite sans voir d'autres affleurements ; puis on en retrouve sept dans une bande de terrain houiller comprise entre deux masses dioritiques, près du village de Soussou. Ils sont malheureusement d'assez médiocre importance. Au delà, la diorite, puis les terrains primitifs.

Les couches que nous venons de passer en revue sont toutes dirigées N.-N.-O. à S.-S.-E. Leur inclinaison varie de 8 à 12°, et, à une seule exception près, elles pendent toutes vers le S.-O.

Couches du Moatise. — Si l'on part du confluent du Rovugo et du Moatise pour remonter cette dernière rivière (voir le plan, *fig.* 2, Pl. XIX), on rencontre d'abord une couche de houille de 1^m,40 de puissance, mais divisée par de nombreux filets de schistes, et ne donnant que du charbon terreux et de mauvaise qualité ; je ne m'y arrêterai pas. Un kilomètre plus loin apparaît une couche plus importante, mesurant 3^m,50 d'épaisseur, déchirée par un filon de diorite qui forme, dans la rivière, une cascade à paroi verticale de 10 mètres de hauteur ; cette couche est, au contact de la roche éruptive, déviée de sa direction et de son inclinaison normales, contournée violemment, et déchiquetée en tous sens par une série de petits rejets ; mais à 180 mètres en amont de la diorite, elle reprend une

allure régulière. La coupe AB (*fig.* 2, Pl. XIX), dessinée sur place, représente fidèlement cet accident.

Négligeons une petite veine de 60 centimètres que nous voyons à 2 kilomètres plus loin, une autre paraissant plus importante, mais dont nous n'avons pu constater l'épaisseur totale, et qui est située à la hauteur de l'affluent l'Inhacanfugo, et arrivons au point où le Moatise reçoit l'Inhapsicondo : nous sommes en présence d'une couche que j'ai nommée *couche du Mangueral*, à cause d'un bois de manguiers qui se trouve dans son voisinage.

Elle a 10 mètres de puissance utile, en trois sillons séparés l'un de l'autre par deux bancs de schiste de $0^m,20$ à $0^m,40$ d'épaisseur. Le toit en est très solide, et le charbon, dur et brillant, clivé en beaux prismes. Relevée par un rejet que l'on voit dans le lit de l'Inhapsicondo, elle reparaît plus loin avec les mêmes allures. A l'ouest du confluent des deux rivières, on remarque un autre rejet de même sens, mais de moindre importance; il est représenté sur la coupe CD (*fig.* 4).

Suivons le Moatise 1.200 mètres encore : nous arrivons à une autre couche, celle *du Haut Moatise*, puissante aussi de 10 à 11 mètres et divisée en trois sillons comme la précédente (coupe EF, *fig.* 5). Je me suis demandé si cette nouvelle veine ne serait pas la même que celle du Mangueral; mais la disposition des clivages, celle des intercalations schisteuses, l'épaisseur des bancs de schiste du toit différant notablement de l'une à l'autre, il est probable que ce sont deux formations différentes. Ces différences, d'ailleurs, n'ont pas été simplement reconnues par un examen superficiel et plus ou moins rapide d'affleurements toujours altérés; je les ai observées en travaillant sérieusement ces couches, dans chacun des sillons desquelles j'ai fait pratiquer des galeries de 12 à 15 mètres de longueur.

On trouve une autre couche de $1^m,80$ à 100 mètres environ en amont de la couche du Haut Moatise; une autre,

de même puissance, sous toit de grès, à l'embouchure de de l'Inhacamba; enfin un affleurement considérable, mais assez confus, apparaît sur l'Inharouca. Au delà de ce point, nous ne rencontrons plus de traces de charbon sur le Moatise, qui arrive bientôt à la diorite et aux terrains primitifs.

A 300 mètres environ en aval du point où l'Inhapsicondo aborde ces mêmes terrains primitifs, affleure, dans le lit même de la rivière où elle détermine une série de petites cascades, une couche de 12 à 13 mètres d'épaisseur que j'ai nommée *couche de l'Inhapsicondo*. Elle a trois sillons, un toit de schiste, et point de grès ni dans le toit ni dans le mur. Le charbon en est bon, mais d'une grande dureté. Sa direction présente une anomalie à noter : elle va de l'O. 22° N. à l'E. 22° S. avec inclinaison de 12° vers le S.-E., tandis que toutes les couches du Moatise, à l'exception d'une seule qui a été déchirée par la diorite, ont des directions comprises entre N. 15° O. à S. 15° E. et N. 30° O à S. 30° E. avec pente de 10 à 12° vers le N.-E. Peut-être faut-il aussi attribuer à la diorite, qu'on aperçoit dans le voisinage, un changement d'allures si complet.

Il serait assurément intéressant de savoir quelles relations peuvent exister entre les couches du Moatise et celles du Moarase; mais le pays est si vaste, d'un accès si difficile, et le temps que j'ai pu consacrer à ces études si restreint, que je n'ai pas recueilli de données suffisantes pour hasarder seulement une hypothèse.

Quoi qu'il en soit, les faits que j'ai observés prouvent la richesse de ce bassin houiller, dont je n'ai parcouru qu'une faible partie.

NOTE

SUR LA

FLORE DU BASSIN HOUILLER DE TETE

(RÉGION DU ZAMBÈZE).

Par M. R. ZEILLER, ingénieur des mines.

M. Lapierre a rapporté des gîtes de charbon qu'il a explorés aux environs de Tete, dans la région du Zambèze, par 16° 9' de latitude australe, un certain nombre d'empreintes végétales que, sur la demande de M. Daubrée, il a bien voulu me communiquer et donner à l'École nationale des mines. Les résultats de l'examen que j'en ai fait m'ont paru intéressants à signaler, en raison de la nouvelle preuve qu'ils fournissent de l'uniformité de la flore sur une grande partie de notre globe à l'époque houillère.

Toutes les espèces que m'ont offertes les échantillons recueillis par M. Lapierre dans les couches du Moatise, se sont, en effet, montrées identiques à des espèces déjà connues et abondamment répandues dans certains bassins houillers de l'Europe, comme on peut le voir par la liste suivante :

Pecopteris arborescens. Schloth. (sp.)— Echantillons tantôt stériles, tantôt fructifiés.

Pecopteris cyathea. Schloth. (sp.) — Se présentant dans les mêmes conditions que le précédent.

Pecopteris unita. Brongt. — Une penne stérile parfaitement caractérisée.

Pecopteris polymorpha. Brongt. — Plusieurs pennes extrêmement nettes.

Callipteridium ovatum. Brongt. (sp.) — Quelques fragments de pennes, bien reconnaissables à la forme et à la nervation des pinnules.

Alethopteris Grandini. Brongt. (sp.) — Plusieurs échantillons en excellent état de conservation.

Annularia stellata. Schloth. (sp.) — Absolument conforme au type figuré par Schlotheim.

Sphenophyllum oblongifolium. Germ. et Kaulf. (sp.) — Je rapporte à cette espèce un *Sphenophyllum* assez incomplètement représenté, dont les feuilles, profondément divisées, rappellent un peu le *Sph. saxifragæfolium*, mais s'élargissent rapidement de manière à présenter un contour ovale; cette forme correspond bien, du reste, aux feuilles divisées de *Sph. oblongifolium*, figurées par M. H. B. Geinitz dans sa Flore houillère de la Saxe.

Sphenophyllum majus. Bronn. (sp.) — Quelques feuilles, à bord malheureusement mal conservé, ne peuvent être attribuées qu'à cette espèce en raison de leur taille et de la disposition de leurs nervures : elles répondent exactement à la forme à feuilles entières représentée par H. B. Geinitz sous le nom de *Sph. longifolium.*

Cordaïtes borassifolius. Sternb. (sp.) — Je rapporte à cette espèce des fragments de feuilles de Cordaïte offrant très régulièrement une seule nervure fine intercalée entre deux nervures plus fortes.

Calamodendron cruciatum. Sternb. (sp.) — Un fragment de tronc cannelé et articulé présente tous les caractères de cette espèce.

Les onze espèces qui viennent d'être énumérées appartiennent à la flore de l'étage houiller supérieur ; elles se rencontrent dans le bassin de la Loire et dans celui du Gard, et je puis citer notamment, dans ce dernier bassin, l'étage de Champclauson, à la Grand'Combe, comme les renfermant toutes. Elles manquent au contraire, pour la plupart, dans le terrain houiller moyen, et si quelques-unes d'entre elles apparaissent dans le Pas-de-Calais, c'est exclusivement dans les couches les plus élevées, à Lens, à Bully-Grenay, etc.

Si donc il ne s'agissait pas d'une région aussi lointaine, je n'hésiterais pas à ranger immédiatement les couches d'où proviennent ces plantes dans l'étage houiller supérieur, et plus près peut-être de la base que du sommet de cet étage, à cause de la présence, parmi elles, du *Sphenophyllum majus*. Mais on peut se demander si les variations de la flore ont bien été simultanées sur toute la surface du globe, et peut-être faut-il se tenir sur une certaine réserve quand il s'agit de fixer avec précision l'âge de dépôts formés à une latitude si différente de la nôtre. Je rappellerai cependant que, pour les couches de charbon que M. Fuchs a explorées au Tong-King, j'ai trouvé une concordance parfaite entre leur flore et notre flore rhétienne, et que la comparaison avec des régions immédiatement voisines, comme l'Inde, m'a conduit à les rapporter précisément à l'étage rhétien (*). D'autre part, on sait que le vrai terrain houiller a été reconnu déjà au sud de l'Afrique, dans la colonie du Cap, avec la même flore qu'en Europe : on y a observé en effet (**) des *Calamites*, l'*Asterophyllites equisetiformis*, le *Pecopteris Cisti*, l'*Alethopteris lonchitica*, le *Lepidoden-*

(*) *Examen de la Flore fossile des couches de charbon du Tong-King. Annales des mines*, 2e vol. de 1882, p. 332.

(**) George Grey, *Remarks on some specimens from South Africa. Quarterly Journal of the geol. Soc.*, t. XXVII, p. 49.

dron crenatum, des *Lepidostrobus*, des *Halonia*, des *Sigillaria* et des *Stigmaria*, ensemble d'espèces qui correspondrait à l'étage houiller moyen. Ces couches houillères sont recouvertes, en stratification discordante (*), par la série des couches triasiques de Karoo (*Karoo formation*), dont l'étage inférieur (*Ekka beds*) appartient peut-être encore au permien.

Ainsi les mêmes espèces qui vivaient en Europe à l'époque houillère se sont étendues jusqu'au sud de l'Afrique, et l'Afrique a possédé, comme l'Europe, les deux flores houillère moyenne et houillère supérieure, caractérisées par les mêmes groupements de formes spécifiques. Cette uniformité dans la végétation de deux régions appartenant à deux hémisphères différents de notre globe est d'autant plus digne d'attention qu'à la même époque, sous le même parallèle à peu près que le Cap, ou plus exactement à une latitude intermédiaire entre le Cap et la région du Zambèze, vivait en Australie un ensemble d'espèces notablement différent, ainsi qu'en témoigne la flore des couches de charbon exploitées dans l'État de Queensland et dans la Nouvelle-Galles du Sud.

Mais laissons de côté la région australienne pour ne considérer que la région, beaucoup plus étendue, à ce qu'il semble du moins par les documents paléontologiques que nous possédons, qui comprend, avec le continent africain, presque tout l'hémisphère boréal, et qui était occupée à l'époque houillère par une flore d'une remarquable uniformité : nous savons en effet qu'en Chine, comme dans toute l'Amérique du Nord, on retrouve dans le terrain houiller les mêmes types spécifiques qu'en Europe.

Cette existence des mêmes espèces à toutes les lati-

(*) Ch. L. Griesbach, *On the geology of Natal in South Africa. Quarterly Journal*, t. XXVII, p. 53, 57.

tudes, aussi bien dans les régions arctiques et tempérées de l'hémisphère boréal que dans les parties de l'hémisphère austral voisines de l'équateur, comme la région du Zambèze, exige que le climat ait été absolument le même partout. Le climat étant uniforme, il est permis de croire que, sur toute la portion du globe occupée par la flore houillère de type européen, les variations de cette flore ont eu lieu partout à la même époque ou du moins à des époques trop peu différentes pour que nous puissions les distinguer, les espèces qui se développaient sur un point, pour s'y substituer à d'autres plus anciennes, rencontrant partout les mêmes conditions et devant se propager très rapidement. Il n'y a donc aucune raison de penser que la flore reconnue dans le bassin houiller de Tete n'ait pas été contemporaine de la flore houillère du bassin de la Loire ou de la Grand'Combe, et il est permis, je crois, de rapporter, au moins avec beaucoup de probabilité, les couches du Moatise explorées par M. Lapierre à l'étage houiller supérieur.

BULLETIN.

ACTES DE COURAGE ET DE DÉVOUEMENT.

ACCIDENTS ARRIVÉS DANS LES MINES ET LES CARRIÈRES.

Extrait de rapports du ministre de l'intérieur approuvés par le Président de la République en 1883 (*).

NOMS prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	MÉDAILLES en argent.	MENTIONS honorables. — LETTRES de félicitations.
		20 janvier 1883. PYRÉNÉES (BASSES-).	classes		
BATS (Michel-Édouard) maréchal des logis à la compagnie de gendarmerie des Basses-Pyrénées.	Mines d'Arre, vallée d'Ossau, 18 nov. 1882	Ont sauvé, au prix des plus courageux efforts, trois mineurs ensevelis sous une avalanche de neige.		2ᵉ	
FIGUÉ-BADIOLE (Jean), gendarme à la même compagnie.				2ᵉ	
		16 février 1883. SARTHE.			
LELANNIER, agent-voyer de l'arrondissement de la Flèche.	Pontvallain, 4 déc. 1882.	S'est exceptionnellement distingué en organisant et en dirigeant, jour et nuit, pendant 60 heures, les dangereux travaux exécutés pour retirer d'un puits un homme qui y était enseveli sous un éboulement à 13 mètres de profondeur.	2ᵉ		
VALNAY (Vincent), ouvrier puisatier à La Courbe-sous-le-Lude.	Id.	N'a cessé de faire preuve du plus rare courage, dans la même circonstance, en occupant, pendant toute la durée des travaux, le poste le plus périlleux,		2ᵉ	

(*) Cet extrait fait suite à celui qui a été publié dans la 6ᵉ livraison de 1882, p. 561.

NOMS prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	 en argent.	 MENTIONS honorables. — LETTRES de félicitations.
		16 février 1883 (suite).			
		SARTHE.	classes		
Boulidard, maçon à Pontvallain.	Pontvallain, 4 déc. 1882.	S'est signalé par sa belle conduite en coopérant aux mêmes travaux de sauvetage.		2e	
		19 mars 1883.			
		LOIRE.			
Montchamp (Alph.), ouvrier rouleur.	Concession houillère de Montbressieux. 30 sept. 1882.	Ont déployé un sang-froid et une énergie au-dessus de tout éloge pour sauver leurs camarades surpris dans les galeries par une inondation subite.		2e	
Balp (Jean-Louis), gouverneur du puits Sainte-Mélanie.				2e	
		2 mai 1883.			
		GARD.			
Pratlong (François-Alexis), de Bessèges, maître-mineur.	Mines de Lalle. 24 avril 1883.	A succombé en cherchant à sauver des ouvriers asphyxiés par une explosion de grisou. Cette médaille, frappée à sa mémoire et remise à sa veuve, est destinée à perpétuer dans sa famille et au milieu de ses concitoyens le souvenir de son héroïque dévouement.	1re		
		12 mai 1883.			
		PAS-DE-CALAIS.			
Barbieux (Henri), boute-feu.	Mines de Liévin, 16 avril 1883.	Se sont dévoués pour porter secours aux victimes d'une explosion de grisou.		2e	
Lamandin (Alex[dre]), porion.				2e	
Leclerc (Léonard), ouvrier mineur.					Félicitations
Denis (Léonce), idem.					Id.
Druard (Florent), Idem.					Id.

NOMS prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	MÉDAILLES en argent.	MENTIONS honorables. — LETTRES de félicitations.

10 juillet 1883.

NORD.

classes

DUPRIEZ, ouvrier mineur. FONTAINES, ouvrier mineur.	Concession houillère d'Anzin, 2 février 1883.	Se sont résolument portés au secours de leurs camarades, lors d'une explosion de grisou.			Félicitations Id.

SAÔNE-ET-LOIRE.

DOUHÉRET (Benoît), chef de poste.	Concession houillère de Blanzy, 1er mars 1883.	A porté secours, au péril de sa vie, à un ouvrier mineur qui était tombé dans un puisard plein d'eau.		2e	

14 août 1883.

GARD.

TRAIN (Jean), maître mineur. TEYSSIER (Régis), chef de poste. VIGNE (Joseph), chef de poste. GILLES (Edouard), boiseur.	Mines de Lalle, 24 avril 1883.	Se sont particulièrement distingués, lors d'une explosion de grisou, en portant secours aux victimes.		2e 2e 2e 2e	
JOUGUET, directeur général des mines et usines de la compagnie de Terrenoire, maire de Bessèges.	Id.	S'est signalé dans les mêmes circonstances, en dirigeant, avec un entier dévouement, les opérations de sauvetage.			Félicitations

PUY-DE-DÔME.

DUFOUR, domicilié à La Sauvetat. DARCÈS, Id. MAILLÉ, Id. LARDIN, Id. RENAUD, Id.	Aubusson, 14 mars 1883.	Se sont signalés en coopérant aux travaux de sauvetage entrepris pour retirer un ouvrier enseveli sous un éboulement dans une carrière souterraine.			Félicitations Id. Id. Id. Id.

NOMS prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	en argent.	MENTIONS honorables. — LETTRES de félicitations.
		6 septembre 1883.			
		EURE-ET-LOIRE.	classes		
HÉDIARD (Pierre), garde champêtre de la commune de Chuisnes.	Chuisnes, 21 mai 1883.	A fait preuve d'un rare dévouement en coopérant au sauvetage de trois ouvriers qui, par suite d'un éboulement, se trouvaient emprisonnés dans une marnière souterraine.		2e	
MASSON, conducteur des ponts et chaussées, à Courville.	Id.	S'est rendu spontanément sur le théâtre de l'accident et a contribué par ses conseils à assurer le succès du sauvetage.			Félicitations
LHÉMERY, exploitant de carrières, à Chuisnes.	de	S'est signalé par sa belle conduite dans les mêmes circonstances.			Id.
		NORD.			
FRARIN, ouvrier.	Houillères de Douchy. 13 avril 1883.	Se sont signalés par le dévouement avec lequel ils ont porté secours à sept ouvriers surpris au fond d'une fosse par une inflammation subite de poussières de charbon.			Félicitations
PARENT (Adolphe), ouvrier.					Id.
DETREZ (Emile), ouvrier.					Id.
		14 novembre 1883.			
		ALLIER.			
BÉGEOT (François), entrepreneur de travaux de fonçage.	Mines de Bert, 18 mai 1883.	S'est particulièrement distingué en travaillant au sauvetage de trois ouvriers écrasés au fond d'un puits par la chute d'une benne chargée de briques.		2e	
		21 décembre 1888.			
		BOUCHES-DU-RHÔNE.			
GUGLIELMETTO (Delphino), ouvrier mineur.	Mines de Trets 23 févr. 1883.	Ont, lors d'un accident survenu dans les mines de Trets, fait preuve de courage et de dévouement en travaillant au sauvetage des victimes.			Mention
BOUISSON (Baptistin), idem.					Id.
BOUISSON (Louis), idem,					Id.

NOMS prénoms et qualités.	LIEUX et dates.	ANALYSE des faits.	RÉCOMPENSES décernées. MÉDAILLES en or.	en argent.	MENTIONS honorables. — LETTRES de félicitations.
		21 décembre 1883 (suite). BOUCHES-DU-RHÔNE.	classes		
CHEYLAND (Créamond) ouvrier mineur.	Mines de Trets 23 févr. 1883.	Se sont signalés à l'occasion du même accident.			Félicitations
PENATY (Ange), idem.					Id.
GAUD (François), idem.					Id.
POURCHIER (Emile), idem.					Id.
BAILLE (Louis), idem.					Id.
FRANÇOIS (Baptiste), idem.					Id.
BOCHIETTY (Charles). idem.					Id.
GERVAJONE (Paul), idem.					Id.

MÉTHODES D'EXÉCUTION DES GRANDS TUNNELS.

La brochure de M. Bridel sur les méthodes de construction rapide des grands tunnels, qui a été brièvement analysée dans ce recueil (*), a donné lieu, de la part de M. Bossi, directeur de l'entreprise du grand tunnel du Gothard, à une réponse qu'il paraît utile de résumer également ici, tant dans un but d'impartialité qu'en raison de l'intérêt technique qu'elle présente. M. Bossi combat les conclusions de M. Bridel, touchant la préférence qu'on devrait toujours accorder à la méthode par la galerie de base, et expose les motifs pour lesquels la méthode belge, c'est-à-dire celle de la galerie de faîte, a paru devoir être adoptée au Saint-Gothard, et serait peut-être encore préférée aujourd'hui si le travail était à refaire.

La première condition en effet n'est pas la rapidité, mais la possibilité d'exécution : or on prévoyait au Saint-Gothard, en raison de la grande élévation du massif rocheux au-dessus du tunnel, un accroissement rapide et considérable de la température, et les prévisions ont été encore au-dessous de la réalité ; on se préoccupa donc avant tout de la ventilation des chantiers, et c'est afin de l'assurer dans les meilleures conditions possibles que l'on fit choix du système d'attaque par galerie de faîte avec établissement des autres chantiers en arrière du front d'attaque, échelonnés dans le sens longitudinal sur le courant de retour de l'air comprimé. Les cheminées verticales et les galeries en calotte de la méthode anglaise se seraient trouvées, ainsi que les recoupes latérales pour l'élargissement, en dehors du courant général, et par conséquent dans des conditions thermiques telles que le travail y eût été tout à fait impossible.

A l'Arlberg même, bien que la température soit de beaucoup inférieure à celle du Saint-Gothard, la montagne étant moins élevée et le tunnel moins long, on a été obligé, du côté Est, au bout de quelque temps, de faire pénétrer dans chaque attaque en cheminée un jet d'air à haute pression dérivé de la conduite des perforatrices. Il convient de faire remarquer à ce propos que l'emploi de l'air comprimé à haute pression présente, sur l'air à faible pres-

---

(*) *Annales des mines*, 2e vol. de 1882, *Bulletin*, p. 568.

sion, l'avantage de la détente, qui produit un rafraîchissement énergique des chantiers, avantage capital quand on se trouve en présence de hautes températures.

Cette question de la température semble devoir désormais primer toutes les autres pour l'exécution des grands tunnels alpins : elle a donné lieu déjà à de nombreuses études, en vue des tunnels projetés du Mont-Blanc et du Simplon, et l'on a été conduit à indiquer des solutions entièrement nouvelles : M. Lommel conseillerait l'adoption de la galerie de base, mais à la condition de percer celle-ci d'un bout à l'autre avant tout élargissement, afin d'établir une ventilation naturelle ; M. Stockalper a proposé de percer deux galeries indépendantes, l'une au faîte, l'autre à la base, et d'achever l'élargissement de la calotte et la construction de la voûte avant d'attaquer le stross.

Ces exemples suffisent à prouver que la question du choix à faire entre les diverses méthodes est loin d'être résolue une fois pour toutes, et que, si la méthode anglaise présente sur la méthode belge certains avantages, de rapidité et de facilité de travail, comme l'a établi M. Bridel, il ne faut lui donner la préférence que sous la réserve d'une étude approfondie des conditions thermiques qu'on doit rencontrer et qui peuvent exercer sur le choix du système de percement une influence prépondérante.

(*Extrait de la brochure intitulée :* Réponse de la Direction technique de l'entreprise du grand tunnel du Gothard, à la brochure de M. l'ingénieur en chef Bridel. *Lausanne*, 1883).

R. Z.

LE PERCEMENT DES TUNNELS ET LA CHALEUR SOUTERRAINE

Par M. G. Revaux.

L'emploi des moyens mécaniques pour l'abatage des roches a réalisé, depuis son application au Mont-Cenis, des progrès considérables, et le problème de la traversée souterraine des massifs montagneux pourrait être considéré comme pratiquement résolu, s'il ne restait encore à vaincre l'obstacle peut-être le moins prévu à l'origine, c'est-à-dire l'accroissement de la température interne.

Trois tunnels ont été successivement percés à travers les Alpes :

le Mont-Cenis, le Saint-Gothard, l'Arlberg, ayant respectivement des longueurs de 12, 15 et 10 kilomètres; les épaisseurs maxima de roche superposée sont de 1.600, 1.700 et 600 mètres, les températures ont atteint les chiffres de 29°,5, 32°,5 et 15°.

La zone des hautes températures ne s'étendit au Mont-Cenis que sur les 500 derniers mètres du percement, aussi les conséquences funestes pour l'homme du travail dans un pareil milieu et l'effet utile extrêmement restreint de ce travail lui-même ne furent pas suffisamment remarqués alors.

Il n'en fut pas de même au Saint-Gothard, où la température limite de 29° fut atteinte dès le cinquième kilomètre à chaque tête, et se maintint égale ou supérieure pendant la traversée des 5 kilomètres restants, inspirant parfois les plus légitimes appréhensions pour le résultat final de l'entreprise.

Les conditions naturelles du tunnel de l'Arlberg le mettaient à l'abri de pareilles éventualités; on sut en outre très intelligemment profiter de l'expérience si chèrement acquise au Saint-Gothard et le percement s'est effectué sans mécomptes.

Imprévue au Mont-Cenis, indifférente à l'Arlberg, la question de la température a été très complètement et très longuement étudiée au Saint-Gothard; l'éventualité de nouveaux percements l'a maintenue à l'ordre du jour, et en fait l'objet de nouvelles et importantes recherches. C'est ainsi qu'en tenant compte à *la fois* du relief du terrain, de la nature et de la conductibilité des roches, le nouveau projet du Simplon n'hésite pas à adopter un tracé coudé et un allongement qui porte la longueur à 20 kilomètres, ces modifications, défavorables au percement proprement dit, permettant d'espérer un abaissement de température de 5 degrés environ sur le tracé en ligne droite, soit 32 degrés au front de taille.

C'est en 1877 que parurent à Berne les premières recherches relatives à la détermination des températures internes, sous le titre de *Studien über die Wärmevertheilung im Gotthardt*, von Dr A. Stappf. L'auteur présente un relevé très complet des températures de l'air, de l'eau et de la roche pour divers points des galeries, depuis les têtes jusqu'aux fronts de taille 4.400 N. et 4.100 S., ainsi que des différences de température entre chacun de ceux-ci et les points de la surface situés sur la même verticale. Il cherche ensuite à déduire de ces observations une relation mathématique entre l'accroissement δ (en degrés centigrades) de température et la profondeur, dans l'hypothèse que cet accroissement est fonction soit de la hauteur verticale h du massif superposé,

soit de la plus courte distance n du point considéré à la surface et il propose les formules suivantes :

$$\delta = \sqrt{41,6593 - 0,1517\,h + 0,00011195\,h^2} + 6,45 + 0,0106\,h$$
$$\delta = \sqrt{36,1682 - 0,1278\,n + 0,000103\,n^2} + 6,01 + 0,0102\,n$$

avec une approximation de $\pm$ 2,50,
ou bien les formules plus simples :

$$\left.\begin{array}{l}\delta = 0,02079\,h \\ \delta = 0,02157\,n\end{array}\right\} \text{avec une approximation de } \pm 4,95.$$

Ces quatre formules, appliquées à la partie centrale du massif du Saint-Gothard, indiquaient des températures variant de 30°,41 à 33°,06, soit une moyenne de 31°,74. La moyenne des observations a été de 30°,43 ; l'écart est par suite de 1°,31.

Ces formules ne sont données par l'auteur que comme applicables à la traversée d'un seul massif montagneux, et non pas à celle d'une série de crêtes alternant avec des dépressions plus ou moins profondes. En effet, l'accroissement de température est plus rapide sous les vallées que sous les sommets. Au point culminant du Gothard, sous l'arête du Kastelaarhorn, l'accroissement de température était de 1° par 56 mètres (température, 30°,5 ; hauteur superposée, 1.717 mètres), tandis que, sous la plaine d'Andermatt, il était de 1° par 21^m,750 (température, 14° ; hauteur superposée, 305 mètres). Calculé dans des conditions sensiblement identiques au Mont-Cenis, l'accroissement accuse 1° par 54 mètres sous les sommets, et par 29 mètres en vallée.

Par suite, les lignes isothermes, comptées à partir de la surface, sont plus espacées au passage des sommets qu'à celui des dépressions ; il s'ensuit qu'à une certaine profondeur il peut exister une ligne isotherme horizontale, bien qu'il y ait des différences de niveau dans le terrain superposé. Appliquant encore le calcul à ce cas spécial pour une section du Saint-Gothard, l'auteur trouve qu'entre les profils 4.600 à 5.900 mètres de la galerie de direction sud, pour des altitudes qui varient de 2.410 à 2.688 mètres, des hauteurs superposées de 1.250 à 1.528 mètres, et des températures (de la roche) de 28°,1 à 30°,8, il existait une ligne isotherme horizontale de 19°,8 à l'altitude de 1.621 mètres, fait qui a pu être vérifié par l'observation directe des températures en plusieurs points de cette ligne.

Cette ligne est une sorte de limite au delà de laquelle l'accroissement de température devient indépendant du relief du sol. Les observations faites au Gothard donnent pour coefficient moyen de

cet accroissement, pour une ligne d'une altitude de 1.109 à 1.145 mètres dans une montagne coupée et pourvue de sommets atteignant 2.900 mètres, le chiffre de 0,02. On sait que pour les terrains plans et d'une faible altitude il est de 0,03 (1° par 30 mètres).

Les formules déduites des observations spréciales au Saint-Gothard sont-elles susceptibles d'être généralisées et appliquées à la prévision des températures pour des percements ultérieurs, à condition bien entendu que les massifs considérés se trouvent présenter un relief extérieur comparable à celui du Saint-Gothard? Il est difficile de répondre *à priori*. En effet, en admettant même qu'elles traduisent avec une rigueur mathématique les résultats de l'observation en un point donné, on ne peut méconnaître qu'elles laissent de côté un certain nombre de facteurs, dont l'influence est suffisante pour faire varier sensiblement les résultats d'un endroit à l'autre. Ce sont, entre autres, la conductibilité des roches, leur degré de perméabilité et l'importance des infiltrations, la direction de la schistosité, les conditions météorologiques de la surface, etc.

C'est ainsi qu'à 2.500 mètres environ de l'entrée nord du Saint-Gothard, où la formule indiquait une température de 12°, celle-ci s'est élevée en réalité à 22°, pendant la traversée d'un banc calcaire qui possédait une conductibilité et un pouvoir calorifique différents de ceux du gneiss avoisinant, et formait en outre un foyer de chaleur distinct par la décomposition de la pyrite.

L'étude de ces influences ne peut être poursuivie utilement que dans le cas d'un nouveau percement; mais elle occupe déjà une place importante dans la rédaction des projets; c'est ainsi, par exemple, que depuis 1878, la Compagnie du Simplon n'a pas mis en avant moins de quatre tracés, chacun d'eux présentant un avantage probable sur le précédent au point de vue des températures.

Le premier projet, qui figurait à l'Exposition de 1878, était un tracé rectiligne de 18.507 mètres de longueur, passant sous une épaisseur de roche de 2.780 mètres maximum et 2.220 moyenne, et les formules du Saint-Gothard donnaient une température de 47° environ au centre du massif. La série des roches traversées consiste en schistes lustrés, schistes cristallins et gneiss.

Une seconde variante, étudiée en 1881, portait la longueur du tunnel à 19.639 mètres; elle avait principalement pour but de déplacer la tête nord, de façon à éviter la traversée de quelques couches de gypse, en les faisant passer sous le niveau du tunnel.

Un nouveau projet, de 1882, se préoccupa exclusivement de la question thermique : il se proposait de passer autant que possible sous les vallées, en évitant les hauts massifs; dans ce but, le tracé comportait une ligne brisée, la brisure se trouvant à 4.500 mètres de l'entrée nord et formant un angle au sommet de 162°. La longueur totale était portée à 19.795 mètres. Les avantages principaux étaient de réduire à 2.292 mètres la hauteur maxima des massifs superposés, et de passer, à 6.000 mètres de la tête nord, et à 4.500 mètres de la tête sud, sous deux vallées, à 700 mètres seulement au-dessous du sol. La température était prévue de 34° à 37°.

Enfin, une dernière étude d'août 1882 modifie la précédente dans le sens suivant. La longueur est portée à 19.999^m,42, la brisure, à 5.260 mètres de la tête, fait un angle au sommet de 155°. Le maximum d'altitude atteint 2.750 mètres, mais à 300 mètres, de part et d'autre de ce point, on retombe à 2.500 mètres, ce qui donne une hauteur superposée de 1.795 mètres seulement. Il bénéficie, comme le précédent, du passage sous le thalweg de deux vallées, à 680 et 1.000 mètres de profondeur. Il prévoit un maximum de température de 35°, soit donc 5° gagnés sur les tracés rectilignes.

Dans ces conditions, la Compagnie du Simplon considère l'entreprise comme pratiquement réalisable, disposant de forces hydrauliques considérables, Rhône et Diveria, elle se propose d'abaisser encore la température de plusieurs degrés, par l'emploi de ventilateurs puissants aux deux têtes, et au besoin par le fonçage de puits d'aérage spéciaux au passage des thalwegs de vallées.

Ce dernier moyen avait déjà été proposé par un ingénieur autrichien, M. Pressel, qui concluait à l'emploi d'un puits auxiliaire à chacune des têtes, l'appel de l'air se faisant, non par un foyer d'aérage, comme c'est le cas habituel des mines, mais par une chute d'eau continue dans l'un des puits, qui refroidirait l'air de ce puits et augmenterait sa densité. La moindre profondeur des puits du Simplon serait de 700 mètres.

La solution la plus pratique serait certainement l'envoi d'une quantité d'air suffisante par des appareils installés aux têtes, et indépendants de ceux qui fournissent l'air à la perforation; c'est ce qui a été fait à l'Arlberg. Mais ce procédé, très bon pour des tunnels de faible longueur, perd une partie de ses avantages dans le cas du Simplon, où la longueur de la conduite atteindrait 10 kilomètres dans la partie qui a besoin de la ventilation la plus

énergique. En effet, la perte de charge est proportionnelle à la distance, et d'après M. Stockalper (*), il ne faudrait pas moins de 800 chevaux de force brute pour envoyer 200 mètres cubes d'air à basse pression par minute dans le tunnel projeté.

Il est naturel de se demander pourquoi la Compagnie du Simplon ne chercherait pas à éviter une partie des obstacles thermiques, en relevant l'altitude de ses têtes de quelques centaines de mètres; mais il ne faut pas oublier que l'une des raisons d'être du tunnel c'est qu'il appartiendrait à une ligne de plaine, les côtés d'entrée et de sortie n'étant qu'à 627 et 689 mètres.

Il a été également question d'une percée souterraine par le Mont-Blanc ; mais les études sont loin d'être aussi complètes que pour le Simplon. D'après les données actuelles, le tunnel aurait une longueur de 18 kilomètres, la hauteur superposée atteindrait 3.000 mètres, et l'on devrait s'attendre à rencontrer une température d'au moins 50°; de plus, par suite de la forme régulièrement conique du massif, les températures supérieures à 30° règneraient sur plus de 10 kilomètres.

Quant à l'action réfrigérante de l'air extérieur après le percement, voici quelques résultats d'observation. La moyenne des températures de l'année 1879 dans la partie centrale du Mont-Cenis a été de 20°, tandis que la moyenne pendant le percement était de 29°,5; c'est donc un refroidissement d'environ 9° obtenu après six années d'exploitation.

Au Saint-Gothard, la température moyenne de l'air qui s'élevait le 29 février 1880 (après-midi du percement) à 21°,69, s'abaissait à 19°,30 le 11 février 1881, et à 14°,15 le 24 février 1882.

L'action réfrigérante de l'air se lie d'une manière étroite au plus ou moins d'activité du trafic, et ces données forment le point de départ d'une étude spéciale sur la ventilation des grands tunnels, qui se poursuit très activement en Suisse, et promet d'être également féconde en résultats.

(*) Stockalper, *Les grands tunnels alpins et la chaleur souterraine*, p. 28.

STATISTIQUE DE L'INDUSTRIE MINÉRALE DE L'ANGLETERRE POUR L'ANNÉE 1882.

D'après les rapports des Inspecteurs des mines pour l'exercice 1882, la production minérale du Royaume-Uni a atteint l'année dernière le chiffre le plus fort qui ait encore été constaté. C'est ce qui ressort de la statistique décennale suivante, d'où il résulte, en même temps, qu'il s'est produit, en 1882, un léger ralentissement dans l'extraction du minerai de fer.

Cette réduction a été toutefois compensée par la quantité de métal obtenu, et quant au charbon, sa production a excédé de 2.500.000 tonnes (*) celle de 1881.

I. *Production des mines de houille, minerai de fer, argile réfractaire et schiste.*

ANNÉES.	CHARBON.	MINERAI de fer.	ARGILE réfractaire.	SCHISTE bitumineux.	TOTAL.
	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
1882	156.499.977	11.505.447	2.209.036	1.119.572	171.334.032
1881	154.184.300	11.858.766	1.896.907	1.019.958	168.956.931
1880	146.969.409	11.664.726	1.938.539	894.119	161.466.793
1879	133 720.393	9.387.766	1.455.003	803.207	145.366.369
1878	132.612.063	10.747.227	1.625.586	813.262	145.798.138
1877	134.179.968	12.014.356	1.813.541	838.395	148.846.260
1876	134.125.166	12.159.580	2.071.983	632.656	148.989.385
1875	133.306.485	12.018.594	1.932.294	442.910	147.700.313
1874	126.590.108	11.693.186	2.067.791	362.747	140.713.832
1873	128.680.131	12.094.827	1.742.193	524.095	143.041.246

II. *Production des mines métalliques.*

ANNÉES.	MINERAI de fer.	MINERAI de cuivre.	MINERAI de plomb.	MINERAI d'étain.	MINERAI de zinc.
	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes	tonnes
1882	3.596.747	52.135	63.605	12.157	31.267
1881	3.244.657	52.583	63.445	11.788	34.134
1880	3.140.269	51.546	68.547	12.327	26.898
1879	2.483.979	48.738	65.596	13.389	20.887
1878	2.559.333	54.568	74.771	14 220	24.682
1877	2 815.848	65.269	76.471	13.341	24.227
1876	2.637.546	71.741	73.465	12.637	23.670
1875	2.673 899	66.214	70.613	12.611	22.342
1874	2.468.732	72.711	69.545	13.162	18.425
1873	2.715.574	86.256	71.315	14.095	13.545

(*) Les tonnes qui figurent dans la présente statistique sont des tonnes anglaises, comme dans les statistiques analogues déjà publiées aux *Annales*. (Voir 7[e] série, t. VI, p. 607 et 628-629; t. VII, p. 612-613.)

Le nombre de travailleurs employés, en 1882, dans les mines métalliques, s'est élevé à 55.506, la moyenne des neuf années précédentes ayant été de 54.507, et les variations observées, tant dans la production que dans le personnel de ces mines, ont été comparativement faibles.

Il en est autrement des mines de charbon; le nombre de celles en exploitation est tombé de 4.501 en 1875, à 3.814 en 1882, mais, malgré cette diminution numérique, le rendement général s'est élevé, l'année dernière, à 171.334.000 tonnes contre 147.700.000 tonnes en 1875. Il est également à remarquer que la production supérieure de 1882 a été réalisée avec moins de bras que la production plus faible de 1875, soit avec un personnel de 503.987 mineurs au lieu de 535.845.

Le tableau suivant donne les principales statistiques relatives aux mines de houille, schiste, etc., pour les dix dernières années :

ANNÉES.	NOMBRE de mines.	NOMBRE de personnes employées.	QUANTITÉS extraites.	PRODUCTION par tête.
			tonnes	tonnes
1882	3.814	503.987	171.334.032	340
1881	3.847	495.477	168.959.931	341
1880	3.904	484.933	161.466.793	333
1879	3.956	476.810	145.366.369	305
1878	3.968	475.329	145.798.138	307
1877	4.231	494.391	148.846.260	301
1876	4.385	514.532	148.989.385	289
1875	4.501	535.845	147.700.313	276
1874	4.332	538.829	140.713.832	261
1873	3.938	514.429	143.041.246	278

D'après le progrès remarquable, indiqué par les chiffres ci-dessus, dans la production par tête, laquelle, de 278 tonnes en 1873, a passé à 340 en 1882, il est évident que les houillères britanniques sont exploitées aujourd'hui d'une manière beaucoup plus efficace qu'elles ne l'étaient au commencement de la décade. Trois causes peuvent être assignées à ce résultat.

En premier lieu les mines les moins productives ont été abandonnées, par la raison que, si leur exploitation pouvait être profitable dans des années de hausse exceptionnelle, telles que 1873 et 1874, elle ne saurait plus l'être avec les cours actuels. Le travail se trouve donc concentré aujourd'hui dans les mines où il est susceptible de produire les meilleurs résultats, et son efficacité s'en ressent.

En second lieu, le travail a pris plus d'énergie qu'il n'en avait

il y a dix ans. A cette époque, une prospérité inusitée avait démoralisé les mineurs : ils touchaient de très forts salaires et en profitaient pour travailler à la fois moins longtemps et plus mollement qu'ils ne le faisaient auparavant et qu'ils ne sentent de nouveau la nécessité de le faire. Enfin, le travail est devenu non seulement plus énergique, mais de meilleure qualité. En vue de faire face à l'augmentation considérable de la demande du charbon et du fer en 1873, l'on s'était trouvé amené à employer dans les mines un grand nombre d'ouvriers sans expérience et sans pratique du métier.

Aujourd'hui, au contraire, les bras inhabiles ont été éliminés et l'efficacité proportionnelle de ceux qui restent s'en est accrue. En outre, comme le montrera le tableau comparatif ci-dessous, la proportion des femmes et des enfants employés dans les mines de houille est actuellement beaucoup plus faible qu'elle ne l'était il y a dix ans :

Age et sexe des travailleurs.

	1882	1873
1° *Sous terre.*		
Garçons de 10 à 12 ans	380	1.202
— de 12 à 13 ans	3.584	11.309
— de 13 à 16 ans	36.914	45.931
— au-dessus de 16 ans	365.314	349.366
2° *A ciel ouvert.*		
Filles de 10 à 13 ans	1	31
— de 13 à 16 ans	307	790
— au-dessus de 16 ans	4.344	5.383
Garçons de 10 à 13 ans	491	2.070
— de 13 à 16 ans	8.066	6.957
— au-dessus de 16 ans	84.586	91.110
	503.987	514.149
Proportion (p. 100) des travailleurs sous terre, au-dessus de 16 ans	90	85,5
Proportion générale (p. 100) de travailleurs sous terre	80,1	79,3

En ce qui concerne la mortalité causée par les accidents dans les mêmes mines, l'on avait espéré que les responsabilités imposées aux patrons par la nouvelle loi, intitulée « *Employers liability Act* », aurait pour effet de la diminuer, et, en réalité, cette loi n'a sans doute pas été complètement stérile. Toutefois, depuis deux ans qu'elle est en vigueur, le taux de la mortalité, quoique inférieur à la moyenne décennale, n'en a pas moins été élevé, ainsi que le feront voir les chiffres suivants :

ANNÉES.	NOMBRE de décès.	MORTALITÉ pour 1.000 personnes employées.
1882	1.126	2,334
1881	954	1,925
1880	1.318	2,718
1879	973	2,010
1878	1.413	2,972
1877	1.208	2,443
1876	933	1,813
1875	1.244	2,321
1874	1.056	1.959
1873	1.069	2,079

Il y a lieu de penser que la forte mortalité indiquée par les résultats ci-dessus est due, en grande partie, à la propre imprudence des mineurs, condition contre laquelle il est particulièrement difficile de lutter.

Plusieurs Inspecteurs des mines sont d'avis que la libéralité des compensations pécuniaires assurées aux victimes d'accidents ou à leur famille, en cas de mort, a contribué quelque peu à rendre les travailleurs plus négligents que par le passé.

L'expérience des trente dernières années a montré cependant qu'il est possible, en tenant la main à l'exécution de sages règlements, de diminuer notamment la mortalité accidentelle. Pendant les dix années écoulées de 1851 à 1860 le taux de cette mortalité a été de 4,072 par mille ; de 1861 à 1870, il est tombé à 3,328, et dans la dernière décade, il s'est encore abaissé à 2,353. Ce sont là des résultats encourageants, et il est à espérer qu'aucun effort ne sera épargné pour que l'amélioration qui en ressort se continue dans l'avenir.

(*Extrait d'un rapport adressé à M. le Ministre des affaires étrangères par M.* Blanchard de Farges, *consul général de France à Londres*).

TABLE DES MATIÈRES

DU TOME QUATRIÈME.

MINÉRALOGIE. — GÉOLOGIE.

MÉCANIQUE. — EXPLOITATION.

MÉTALLURGIE. — MINÉRALURGIE.

OBJETS DIVERS.

BULLETIN.

EXPLICATION DES PLANCHES

DU TOME QUATRIÈME.

Pl. I, II, III, IV et V, *fig.* 1 à 12. — Étude sur le bassin de Fuveau.

Pl. V, *fig.* 13 à 16. — Compensateur système Dujour.

Pl. VI. — Etude des moyens propres à prévenir les collisions de trains occasionnées par la rencontre de plusieurs voies.

Pl. VII. — Explosion d'une chaudière verticale aux forges de Marnaval.

Pl. VIII à XVII et Pl. XVIII, *fig.* 1. — Etudes sur la combustion des mélanges gazeux explosifs.

Pl. XVIII, *fig.* 2. — Accident survenu le 12 juillet 1883 au puits des Rosiers.

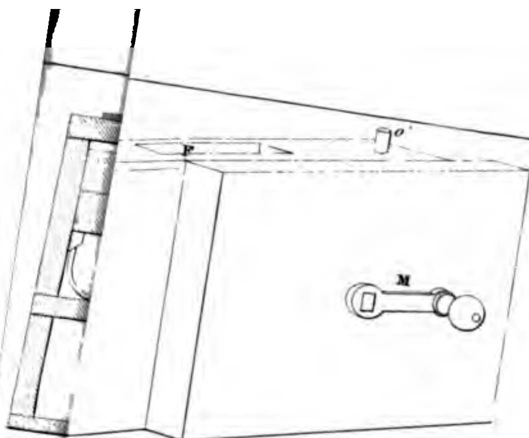
Pl. XIX. — Bassin houiller de Tete.

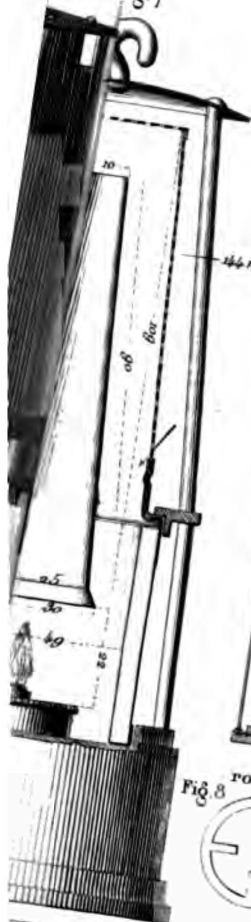
ERRATUM.

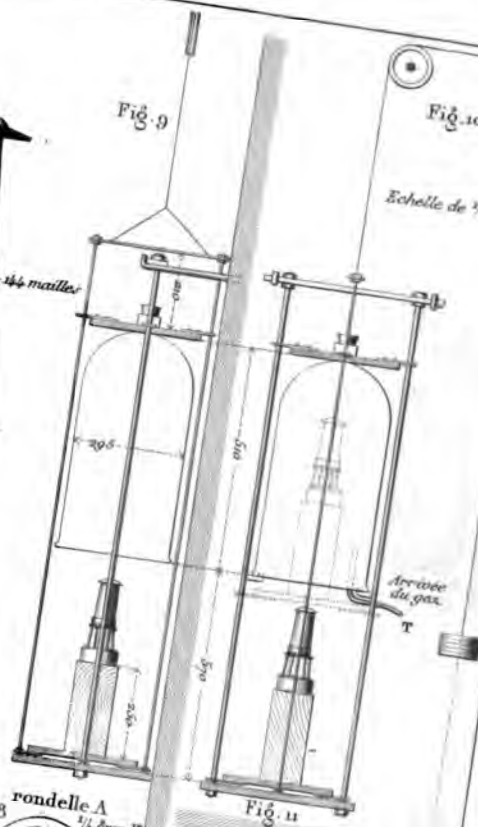
Pl. I. — A la faille f^{IV} les hachures, indiquant le côté qui est descendu, doivent être placées du côté nord, et non pas du côté sud de la faille comme le dessin l'indique par erreur.

PARIS. — IMP. C. MARPON ET E. FLAMMARION, RUE RACINE, 26.

Pl. I





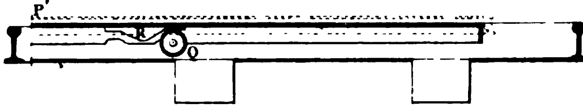


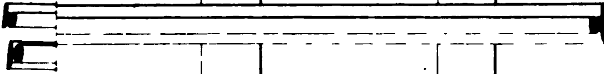


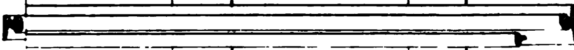


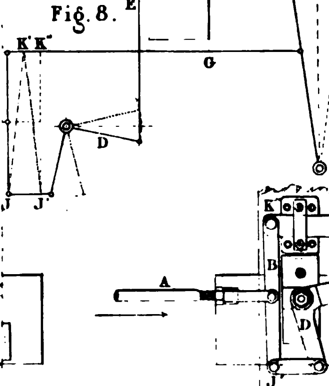
Macquet sc.

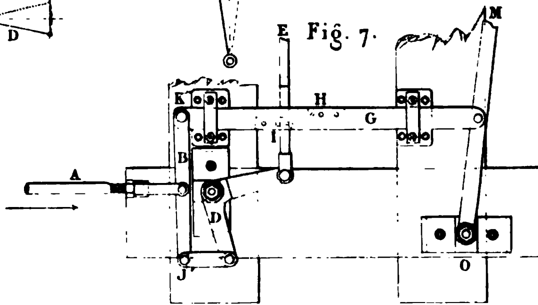
(...re Dujour)











$0^{m}.04$ p^{r} 1 mètre

Macquet sc.

ILLÈR
ON GR
E HARV

1/7000

D

DIAGRAMME 1

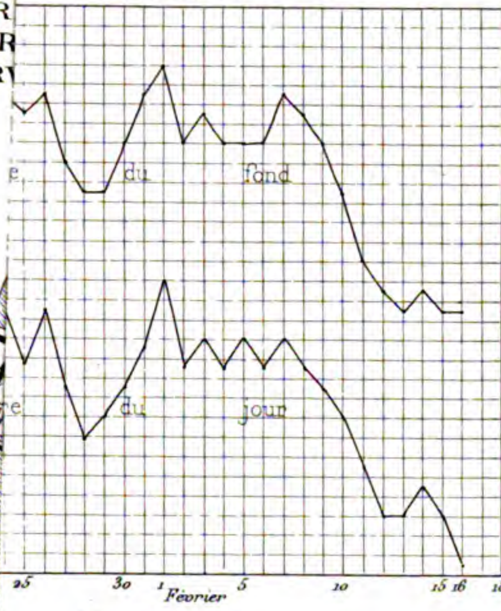


DIAGRAMME 2

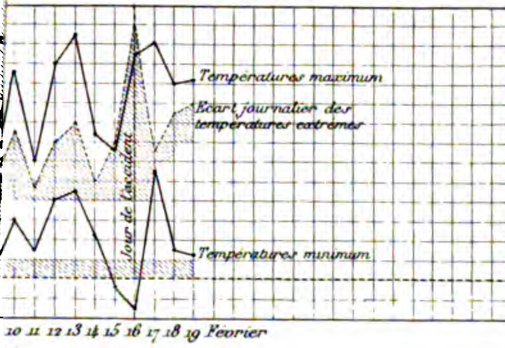
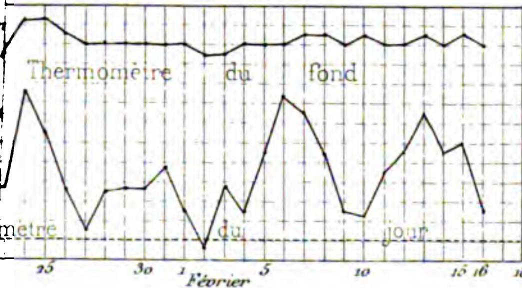
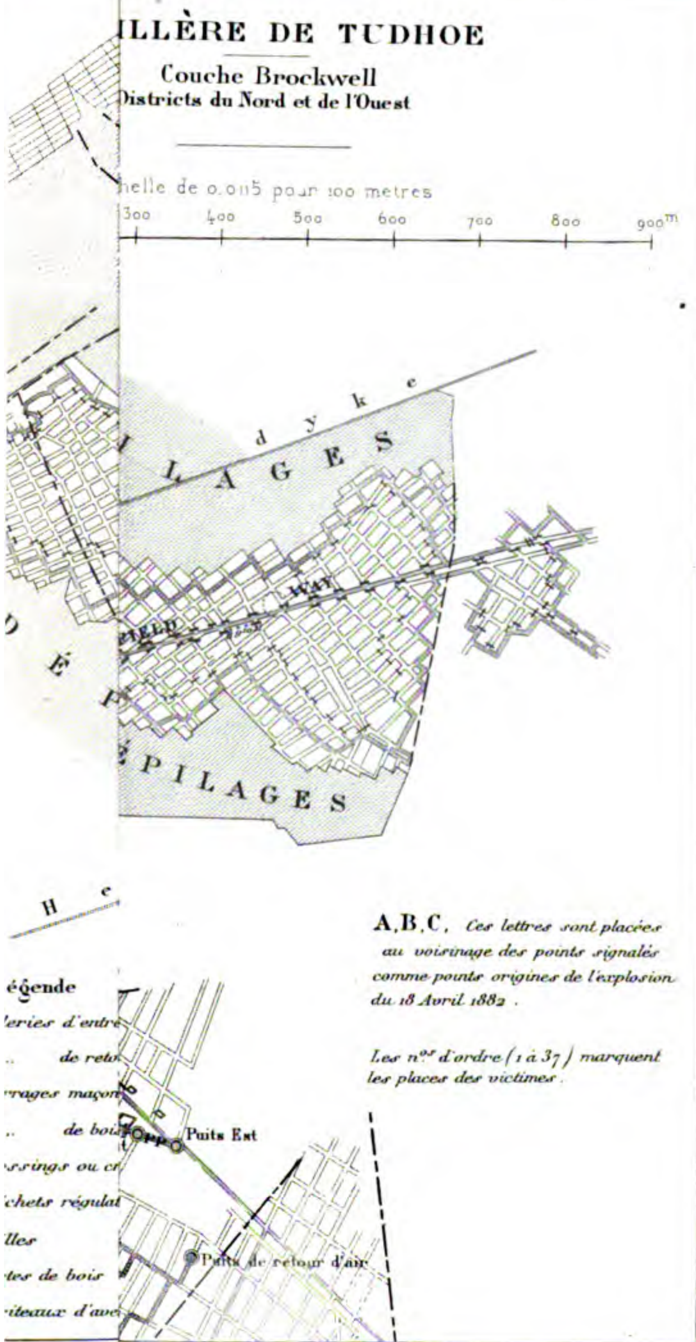


DIAGRAMME 3



rages maçon
rages en bo
les
chets regulat
es ou portier
sings ou cr
s d'entrée d
de retour
es
l'ordre (1 à
rie T. III pa

Macquet sc



A, B, C. *Ces lettres sont placées au voisinage des points signalés comme points origines de l'explosion du 18 Avril 1882.*

Les n.os d'ordre (1 à 37) marquent les places des victimes.

Macquet sc.

PL.V

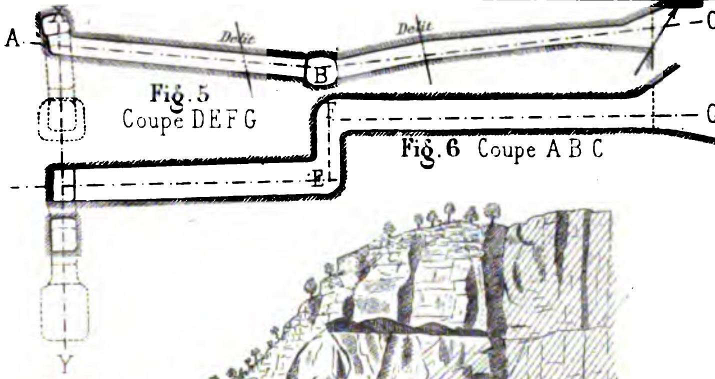


Fig. 5 Coupe D E F G

Fig. 6 Coupe A B C

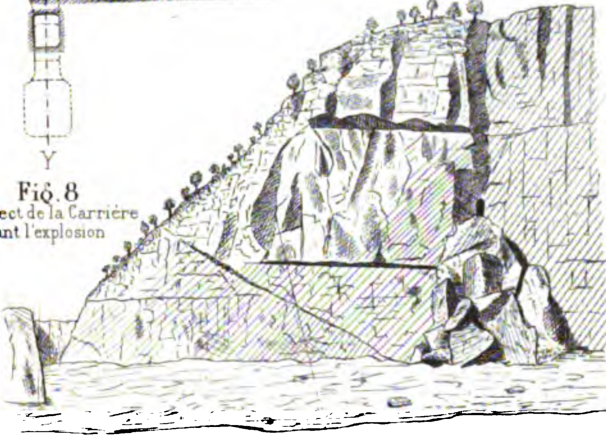


Fig. 8 Aspect de la Carrière avant l'explosion

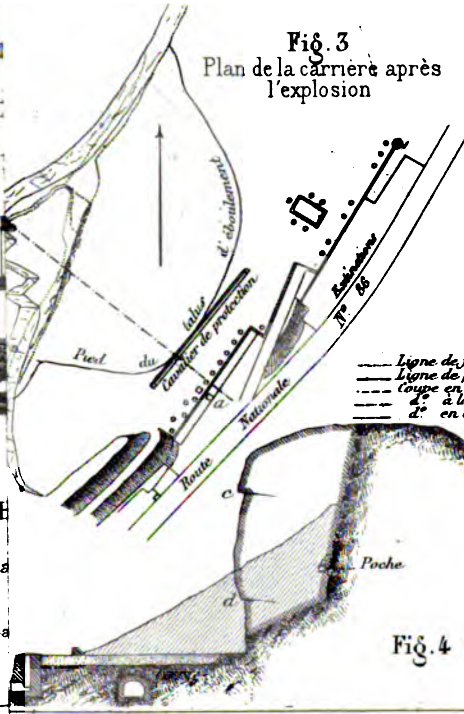


Fig. 3 Plan de la carrière après l'explosion

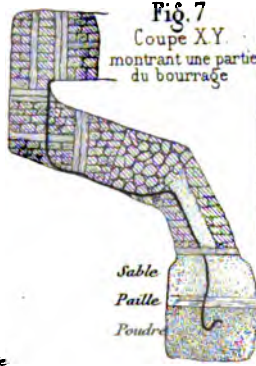


Fig. 7 Coupe X.Y. montrant une partie du bourrage

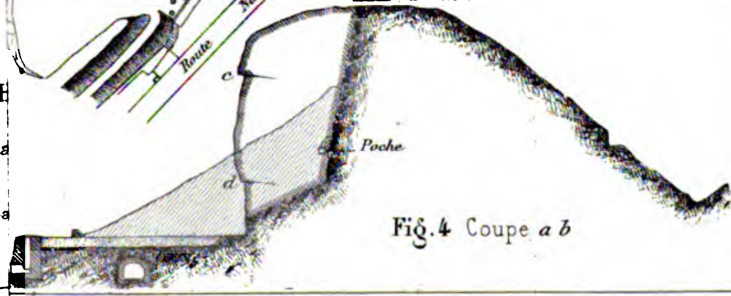


Fig. 4 Coupe a b

Macquet sc

Fig. 4

Voie de garage

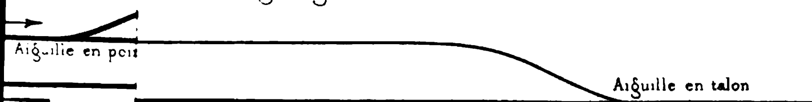


Fig. 5

Voie de garage avec voie de sécurite

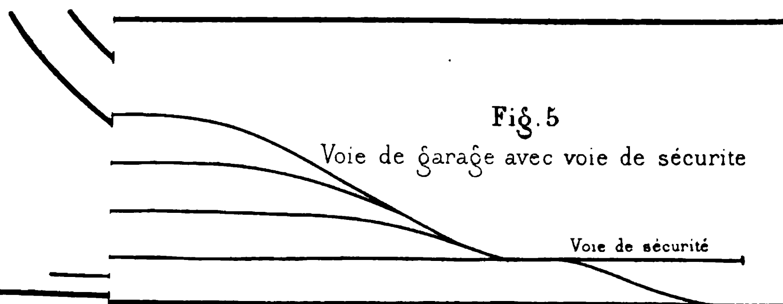


Fig. 6

t rencontrer ou rejoindre une autre voie principale

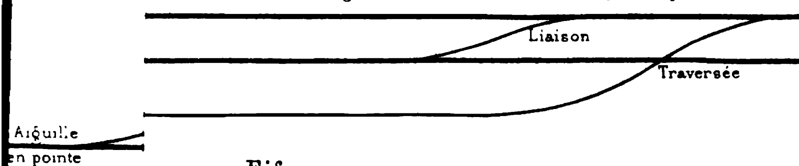


Fig. 7

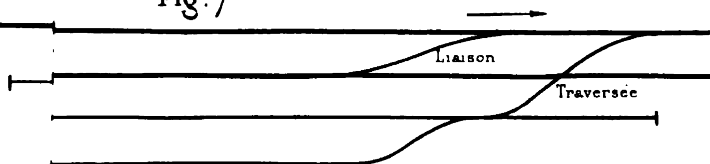
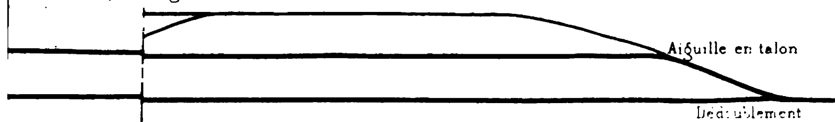


Fig. 9

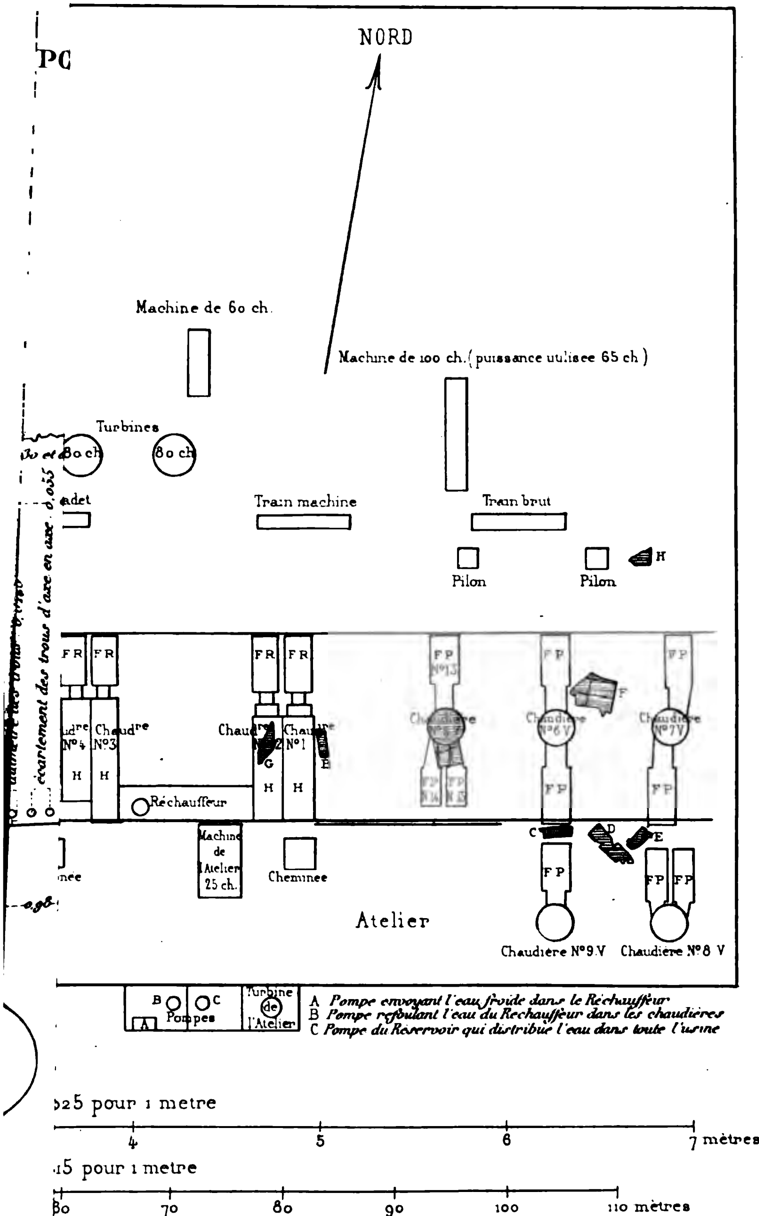
Lignes a voie unique



 Macquet sc.



ĠE DE MARNAVAL



Macquet sc

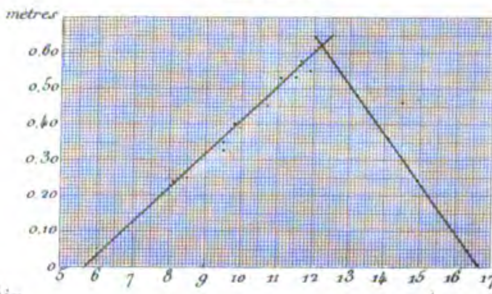


Fig. 7

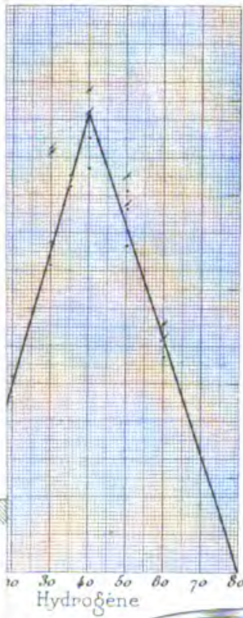


Fig. 6

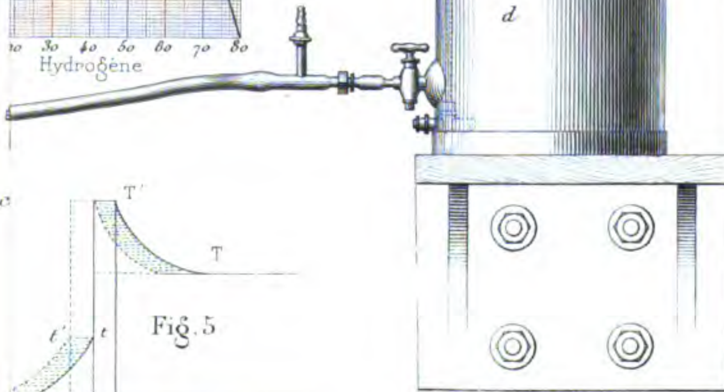
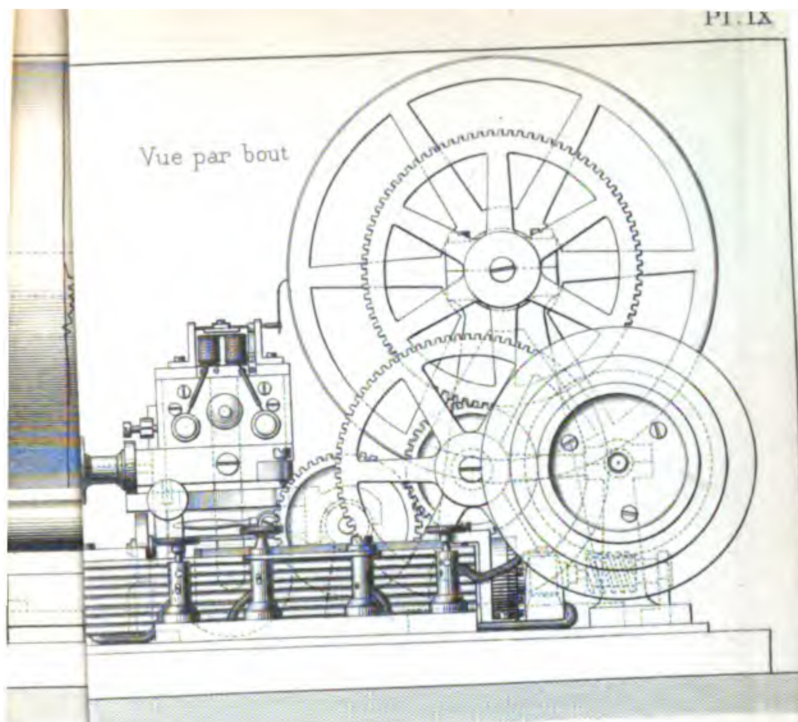
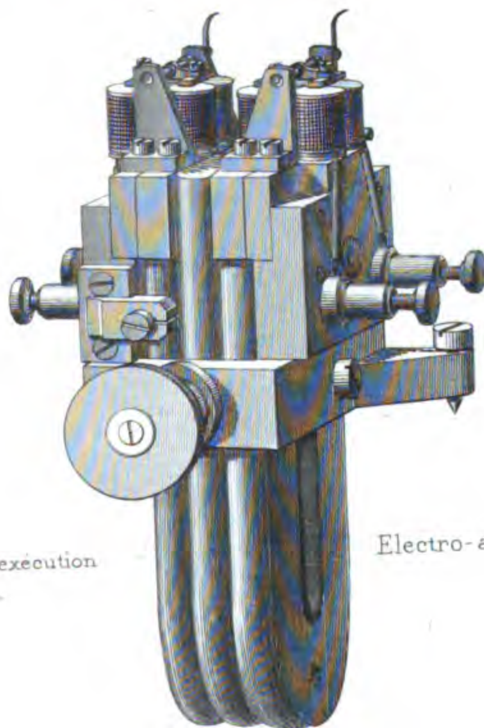


Fig. 5

Macquet sc.


Vue par bout


4/5 d'exécution
Electro-aimant



T. IV. 8

Macquet sc





Fig. 7



Fig. 3

Macquet sc.

Fig. 3
1,5
2
1,200°
4
5
6
7
8
9
10
300
400
500
600
$x - x_0 = y$

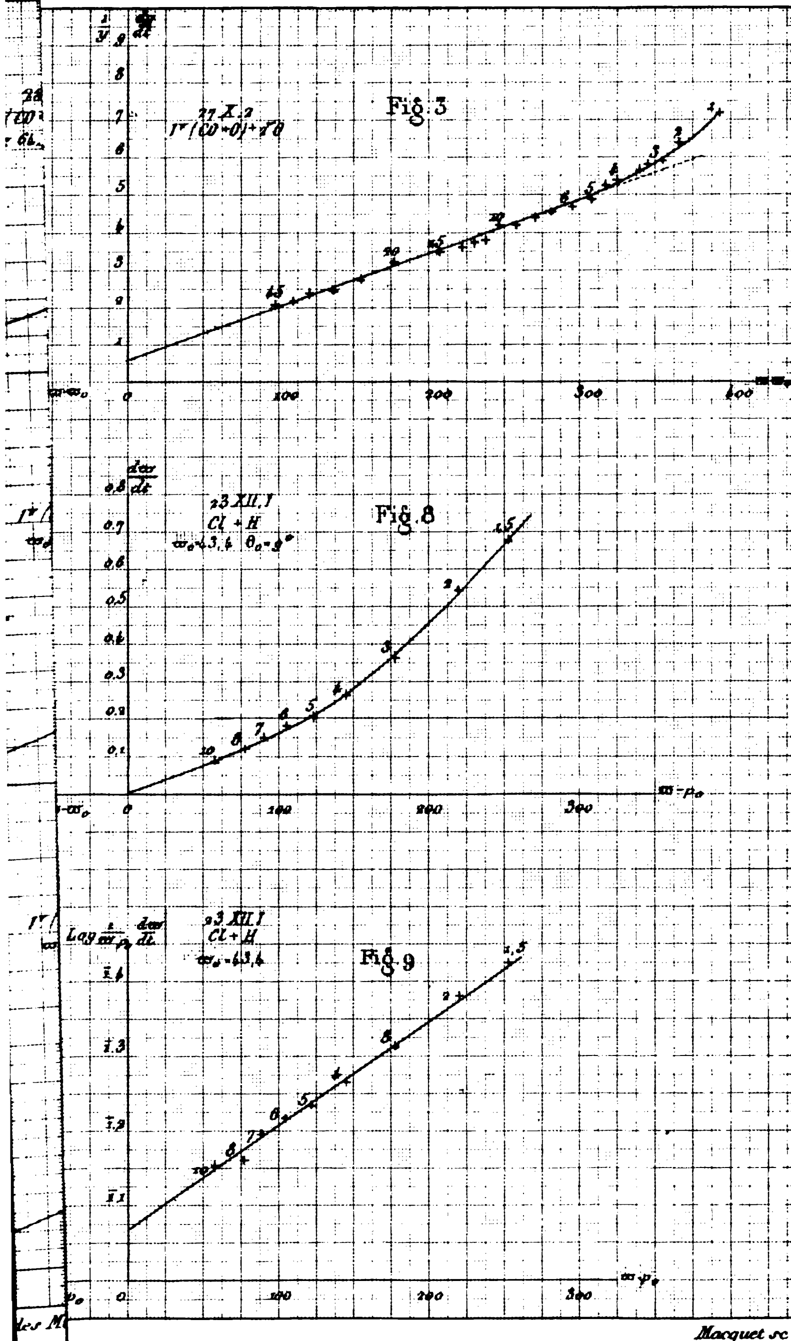
Fig. 4
1,5
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
300
400
500
600
$x - x_0 = y$

Fig. 1

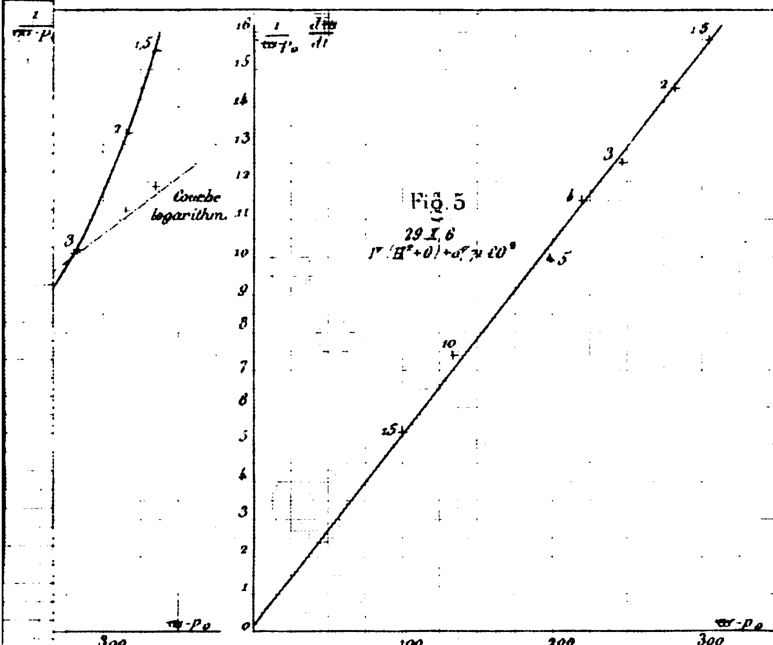
$\text{Log} \frac{1}{y} \frac{dy}{dt}$
Fig 6
$\bar{1},5$
4
3
2
1
$\bar{1},0$
9
8
7
6
$\bar{2},5$
1
1,5
2
2,5
4
5
7
25,5
100
200
300
$x - x_0 = y$

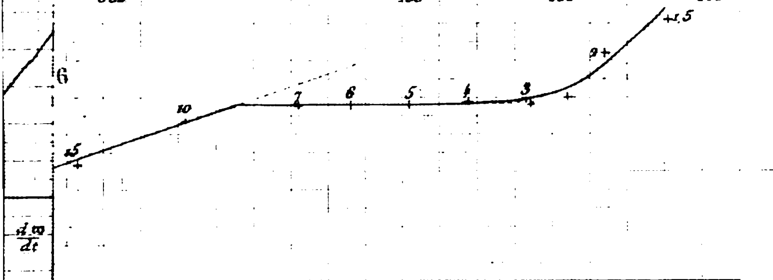
Macquet sc.

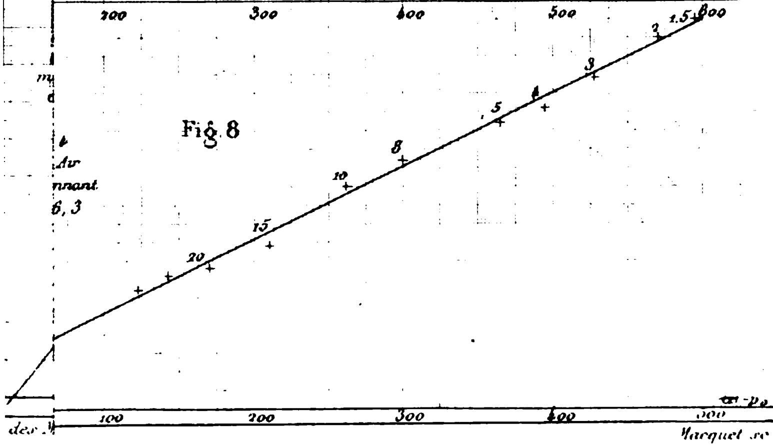
Pl. XIII

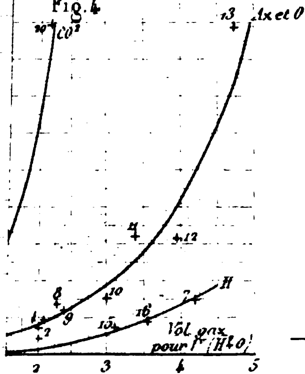


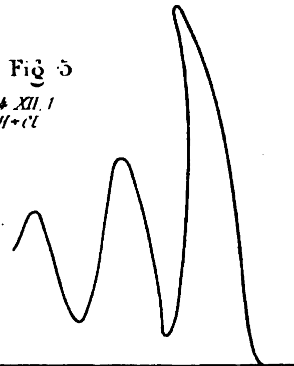
Macquet sc


Fig. 5
29 I. 6
Courbe logarithm.



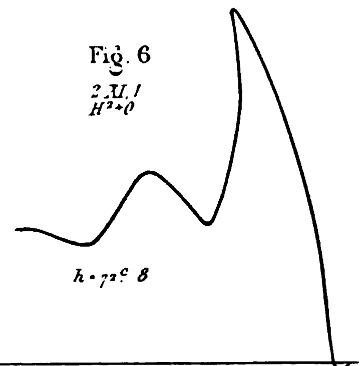

Fig. 8



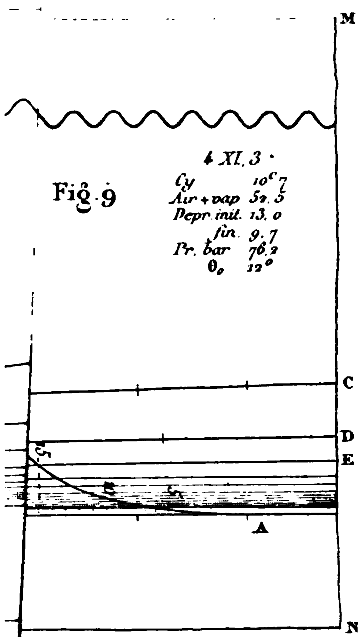


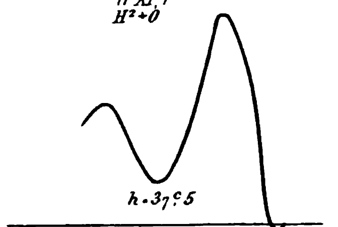
Echelle de ½





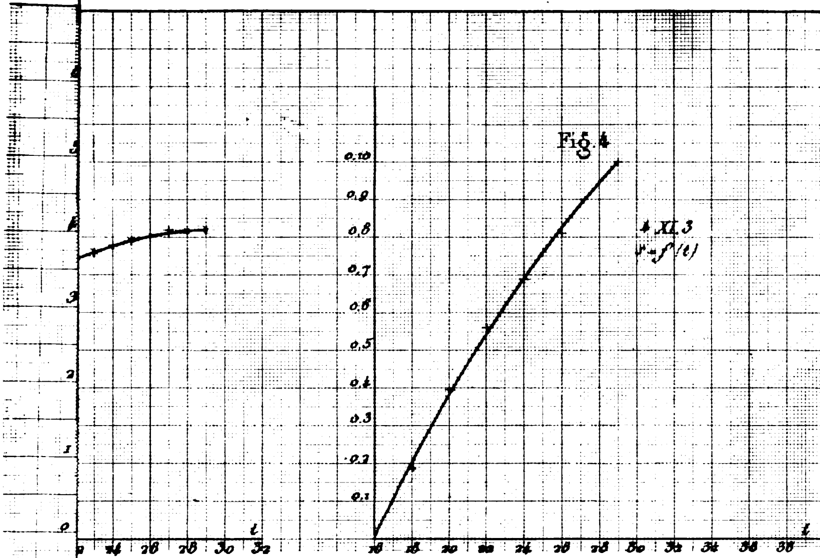
Echelle de ½

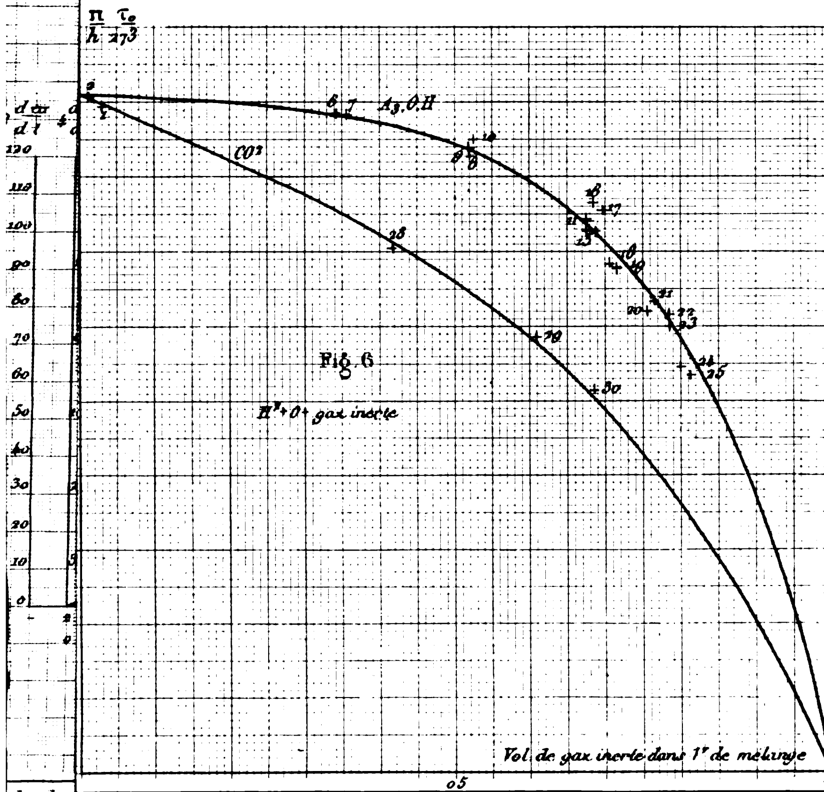




Echelle de ½

Macquet sc


Fig. 4
0.10
0.9
0.8
0.7
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
t
16
18
20
24
26
28
30
32
34
36
38


CO²
Fig. 6
Vol. de gaz inerte dans 1ᵛ de mélange
o5

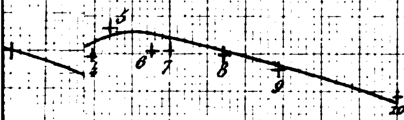


Fig. 2

CH^4 + Air

Vol. de CH^4 dans l'r mélange

0,10 0,11 0,12 0,13 0,14 0,15

CO^2 form. (2)

CO^2 form. (1)

leurs spécifiques moléculaires à volume constant

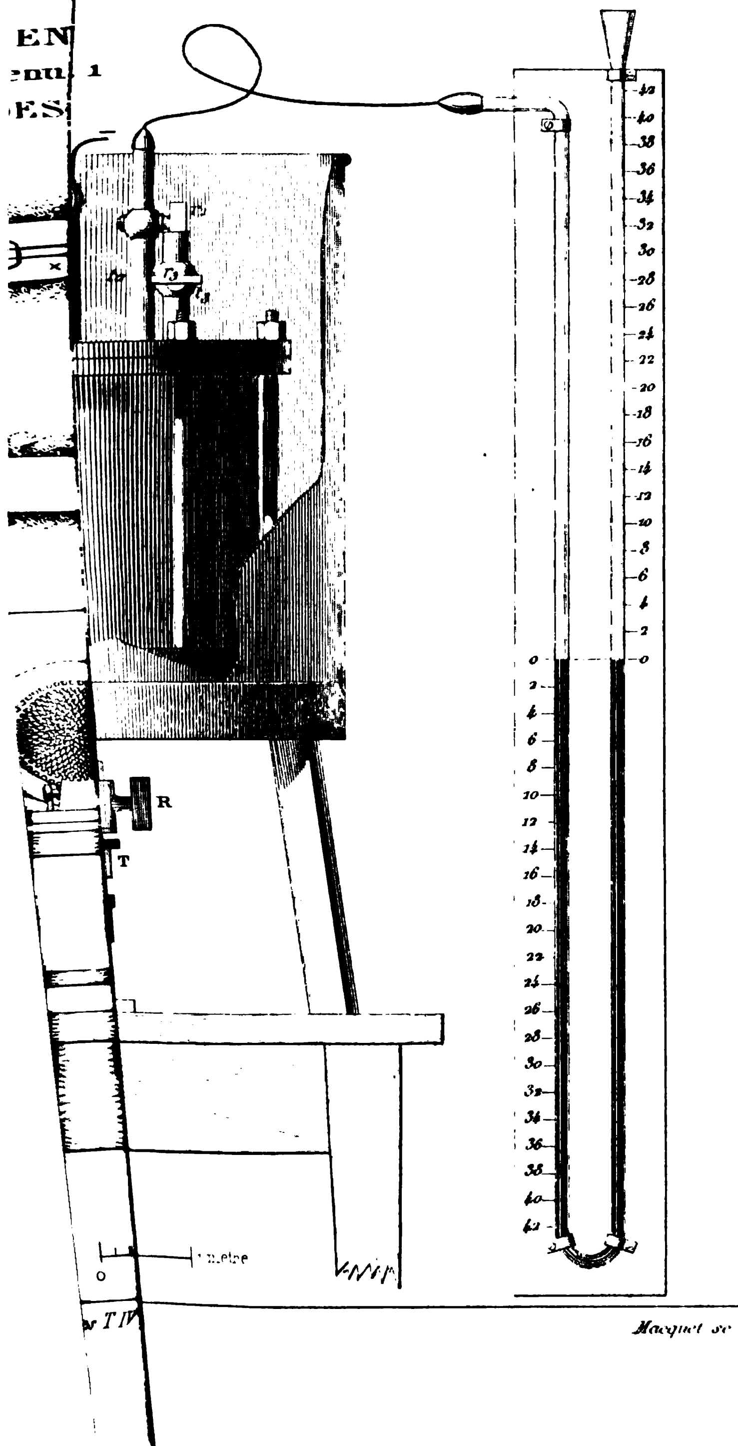
CO^2

Cy

Gaz parfaits

2000° 3000°

Macquet sc.


Pl XVIII
R
T
0
1 mètre
42
40
38
36
34
32
30
28
26
24
22
20
18
16
14
12
10
8
6
4
2
0
Macquet sc

N. vrai

Fig. 2
PLAN
du Bassin houiller du
MOATISE

Echelle de $\frac{1}{80.000}$

Catarınha
Chingoso
Marub
Matanda
San Maoun
Inahacurçoa
Pay
Zambèze
Couche du Manguerala
Couche de l'Inhapsicondo
Inhapsicondo
Palira
Couche du Haut Moatise
Sincé
Inhacamba
Inharouca
D
E
F
Primitifs
Plaine Couverte
Couverte
Plan de Chicova
Rapides de Ka
B
éveloppée)
Inhapsicondo
D
Morumbala
Se
oppée)

Légendes des Fig. 3.4 et 5

Terre végétale
Schistes Houillers
Grès
Houille

Echelle des Fig. 3.4 et 5: $\frac{1}{3000}$

F

Macquet sc.



